



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA ÚLTIMA DE VIGAS DE GRAN CANTO CON ALMA DE CHAPA CONFORMADA.

Trabajo realizado por:
Alejandro González Ruiz

Dirigido:
Miguel Ángel Serna Oliveira

Titulación:
Grado en Ingeniería Civil
Mención en
Construcciones Civiles

Santander, Junio de 2019

TRABAJO FIN DE GRADO

A mis padres y a mis hermanos,
por su incondicional apoyo durante todo este tiempo.

Agradecimientos

Hoy es 21 de junio de 2019 y por fin puedo decir que he terminado mi Trabajo de Fin de Grado. He estado trabajando en este proyecto durante mi último curso del Grado en Ingeniería Civil y debo reconocer que la realización de esta labor me ha abierto las puertas a un mundo hasta ahora desconocido para mí: el campo de la investigación.

En las siguientes líneas quiero agradecer a todas aquellas personas sin las cuales nada de esto hubiese sido posible.

En primer lugar, tengo que nombrar a mi director de proyecto, Miguel Ángel Serna Oliveira. Cursé con él la asignatura de Resistencia de Materiales del segundo curso del grado en Ingeniería Civil, y su manera de dar la clase, eficiente y ordenada, lo convirtió para mí en un potencial candidato a dirigir mi proyecto de fin de carrera. Antes de comenzar el último curso, entramos en contacto. Él me ofreció la posibilidad de realizar un trabajo diferente al resto: un estudio de investigación. No dudé un instante, y fruto de tal decisión, hoy puedo mostraros la presente obra.

En segundo lugar, no puedo dejar de mencionar a mi familia: a mis padres y a mis hermanos. El hecho de que yo haya llegado a este punto, a un paso de terminar mi grado en Ingeniería Civil, es debido en parte a su incondicional apoyo. Ellos me inculcaron la idea del máximo esfuerzo y el trabajo continuo para conseguir mis objetivos.

Me gustaría mencionar también a mis amigos y compañeros. Muchos de ellos han estado durante este tiempo ocupados con sus respectivos trabajos, sin embargo, he de reconocer que no han sido pocas las ocasiones en las que nos hemos prestado ayuda y que su apoyo ha resultado ser crucial en los momentos difíciles.

Finalmente, no puedo cerrar este capítulo sin antes agradecer a la Universidad de Cantabria, concretamente a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. En esta escuela no solo he recibido la formación necesaria para desempeñar las labores de un ingeniero civil, sino que además, me he formado como persona, como alguien dispuesto a mejorar los problemas de la sociedad de la mejor manera posible.

Tan solo puedo decir, muchas gracias a todos.

Alejandro González Ruiz, 21 de Junio de 2019.

Resumen

Versión castellano

El uso de vigas de alma corrugada ha crecido considerablemente en los últimos años. Éstas presentan, en comparación con las vigas de alma plana, una mayor rigidez y una mayor resistencia última. Los dobleces del alma actúan como rigidizadores constituyendo un soporte capaz de aumentar su resistencia al pandeo por cortante. En definitiva, las vigas de alma corrugada son más eficientes en el uso del material: con la misma cantidad soportan una carga externa superior. Se reduce así el peso de la estructura y se logra, al mismo tiempo, una mayor integración estética de la estructura en el edificio, evitando su tendencia habitual, que era apartarla del campo visual.

Las vigas de alma corrugada se pueden clasificar de diferentes formas. Dos de las clasificaciones más importantes son: en función de la variación de la altura del alma, h_w ; y en función de la forma de las corrugas del alma. Atendiendo al primer criterio, las vigas pueden ser de altura variable y de altura constante. En lo que respecta al segundo, encontramos principalmente, vigas de alma corrugada sinusoidal y vigas de alma corrugada trapezoidal. En este trabajo se emplearon vigas con altura del alma constante y chapa conformada trapezoidal.

La resistencia última de las vigas de gran canto con alma de chapa corrugada ha sido estudiada por numerosos autores en las últimas décadas. Existen al respecto estudios tanto analíticos como experimentales. Cabe destacar la recopilación realizada por Hasan et al. en [2], donde podemos encontrar los artículos sobre el uso de vigas corrugadas en estructuras de acero y mixtas publicados en los últimos años.

Sin embargo, observamos que la información disponible acerca del comportamiento y resistencia última de las vigas de alma corrugada en comparación con la de las vigas de alma plana convencionales es escasa. Sabemos que las vigas de alma corrugada presentan una capacidad resistente superior a las vigas de alma plana de iguales características, pero consideramos necesario cuantificar con mayor precisión el valor de este incremento. Este planteamiento nos lleva a un nuevo interrogante: si aumentamos el número de rigidizadores intermedios en las vigas de alma plana, ¿seremos capaces de llegar a alcanzar el valor de la resistencia última que soportan las vigas de alma corrugada?

Por otro lado, creemos que es necesario estudiar con mayor grado de detalle los efectos derivados que el uso de vigas de alma corrugada conlleva. Sustituir la chapa plana del alma por una corrugada da lugar a una serie de beneficios,

pero implica también, efectos negativos, como la pérdida de ductilidad y el colapso frágil, que conducen a un fallo repentino sin previo aviso.

Para la realización de nuestro estudio y tratar de dar respuesta a todos estos interrogantes, fue necesario, en primer lugar, modelar los dos tipos de vigas en un software de Elementos Finitos. En nuestro caso el programa elegido fue *ANSYS Structural Analysis*.

Para la definición de la geometría de las vigas de alma corrugada nos basamos en el modelo presentado por Hassanein and Kharoob en [9]. Fue necesario, además, imponer a las vigas una imperfección inicial. En nuestro caso establecimos como tal la forma que adquiere la viga en el primer modo de pandeo multiplicada por una escala, siguiendo los directrices fijadas en el Eurocódigo EN1993-1-5. El valor de la escala adoptado se correspondió con el espesor del alma en cada caso, tal y como establecía, nuevamente, Hassanein and Kharoob en [9].

Posteriormente, se modelaron vigas de alma plana de iguales características pero con diferente número de rigidizadores intermedios: vigas con 0 rigidizadores intermedios, similares a las corrugadas cuya única variación es el conformado de la chapa del alma; y vigas con 1, 2 y 3 rigidizadores intermedios.

Durante el análisis por Elementos Finitos fuimos obteniendo las curvas Fuerza-Desplazamiento de todas las tipologías estudiadas, así como los valores de la rigidez, la carga máxima sustentada y la carga elástica de pandeo. La comparación de todos estos datos nos permitió llegar a una serie de interesantes conclusiones.

Pudimos observar cómo la carga máxima resistida por las corrugadas es aproximadamente el doble que la resistida por las vigas de alma plana y 0 rigidizadores en todos los casos estudiados de altura $h_w = 2400\text{ mm}$ y para el caso de $h_w = 1600\text{ mm}$ y espesor 6 mm. Por otro lado, contemplamos cómo si aumentamos hasta 3 el número de rigidizadores intermedios en vigas de alma plana logramos alcanzar una resistencia última mayor en los casos con $h_w = 1600\text{ mm}$, no siendo así para $h_w = 2400\text{ mm}$, donde la carga máxima de las corrugadas se mantuvo siempre por encima de las de alma plana con 3 rigidizadores.

En lo que respecta al comportamiento y modo de fallo de las vigas, fue observada una diferencia fundamental. Las vigas de alma plana presentaron un comportamiento dúctil antes de alcanzar la resistencia última, especialmente cuando los modelos analizados tenían espesores del alma pequeños, $t_w = 6\text{ mm}$. La carga elástica de pandeo calculada para todos los casos de vigas de alma plana resultó ser inferior a la carga máxima real resistida, por lo que es

probable que esta ductilidad se debiese al desarrollo de la resistencia post-pandeo con la aparición de tensiones de membrana de tracción.

Por el contrario, en vigas de alma corrugada, el modo de fallo observado era siempre el colapso frágil a cortante del alma. Los valores de la carga elástica de pandeo obtenidos fueron siempre superiores a la resistencia última alcanzada. Este hecho puede explicar tal colapso frágil, pues no se desarrollaba la resistencia post-pandeo que aportaba a la vigas de alma plana cierta ductilidad. Cabe destacar la excepción que presentaron las vigas de alma corrugada y espesor $t_w = 12 \text{ mm}$. En este caso las vigas presentaban un comportamiento dúctil antes del fallo, pero tal comportamiento no era debido al desarrollo de resistencia post-pandeo, sino a la plastificación de las alas.

Finalmente se comprobó la correspondencia de la formulación propuesta por el Eurocódigo EN1993-1-5 para el cálculo del Estado Límite Último en vigas de alma corrugada con los resultados obtenidos en el análisis por Elementos Finitos realizado con ANSYS. Se llegó a la conclusión de que dicha formulación predice correctamente el mecanismo de fallo que presentan las vigas. Sin embargo, se observó cómo los valores máximos de resistencia calculados son conservadores, pues, de acuerdo con los resultados proporcionados por ANSYS, las vigas son capaces de resistir una carga mayor. Esta diferencia se debía principalmente a que la formulación del Eurocódigo EN1993-1-5 supone que todo el cortante es resistido únicamente por el alma y que todo el flector es resistido de forma única por las alas, cuando en realidad tiene lugar una interacción entre ambas partes.

A modo de cierre del presente documento se incluyen dos Anejos. En el primero se muestran con mayor grado de detalle los cálculos realizados para la obtención de la resistencia última de vigas de alma corrugada según la formulación que figura en el Eurocódigo EN1993-1-5. En el segundo se reproduce la comunicación que se presentará en el congreso internacional: “The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structure”, el cual tendrá lugar en la ciudad de Praga del 11 al 13 de Septiembre de 2019.

Versión inglés

The use of steel plated girders with corrugated webs has grown considerably in recent years. They have, in comparison with the flat web girders, greater rigidity and greater ultimate strength. The folds of the web act as stiffeners constituting a support able to increase its resistance to shear buckling. Definitely, corrugated web girders are more efficient in the use of material: with the same amount they support a higher external load. This reduces the weight of the structure and achieves, at the same time, a greater aesthetic integration of the structure in the building, avoiding its habitual tendency, which was to hide it from the visual field.

Corrugated web girders can be classified in different ways. Two of the most important classifications are: depending on the variation of the web height, h_w ; and depending on the shape of the web corrugations. According to the first criterion, we have prismatic web girders and tapered web girders. Regarding the second, we mainly find sinusoidal corrugated web girders and trapezoidal corrugated web girders. In this work, prismatic and trapezoidal corrugated web girders were used.

The ultimate strength of steel plated girders with corrugated webs has been studied by numerous authors in the last decades. There are both analytical and experimental studies. Noteworthy is the compilation made by Hasan et al. in [2], where we can find the articles about the use of corrugated beams in steel and mixed structures published in recent years.

However, we observed that the information available about the behavior and ultimate strength of the corrugated web girders compared to that of conventional flat web girders is scarce. We know that corrugated web girders have a higher resistance capacity than flat web girders with the same characteristics, but we consider it necessary to quantify with greater precision the value of this increase. This approach leads us to a new question: if we increase the number of intermediate stiffeners in the flat web girders, will we be able to reach the value of the ultimate strength that the corrugated web girders support?

In addition, we believe that it is necessary to study in greater detail the derivative effects that the use of corrugated web girders entails. Replacing the flat sheet of the web with a corrugated sheet provides a series of benefits, but also implies negative effects, such as, loss of ductility and fragile collapse, which lead to a sudden failure without warning.

To carry out our study and try to answer all these questions, it was necessary, firstly, to model the two types of beams in a Finite Element software. In our case, the chosen program was ANSYS Structural Analysis.

We used the model presented by Hassanein and Kharoob in [9] to define the geometry of corrugated web girders. It was also necessary to impose an initial imperfection on the beams. In our case, we established as such the shape acquired by the beam in the first buckling mode multiplied by a scale, following the guidelines set in Eurocode EN1993-1-5. The value of the scale adopted corresponded to the web thickness in each case, as established, again, Hassanein and Kharoob in [9].

Subsequently, flat web girders with the same characteristics but with different number of intermediate stiffeners were modeled: beams with 0 intermediate stiffeners, similar to the corrugated ones whose only variation is the shape of the sheet of the web; and beams with 1, 2 and 3 intermediate stiffeners.

During the analysis by Finite Elements we were obtaining the Force-Displacement curves of all the typologies studied, as well as the values of the rigidity, the ultimate strength and the buckling elastic load. The comparison of all these data allowed us to reach a series of interesting conclusions.

We observed how the maximum load resisted by the corrugated ones is approximately double that the one resisted by the girders of flat web and 0 stiffeners in all the studied cases of height $h_w = 2400 \text{ mm}$ and for the case of $h_w = 1600 \text{ mm}$ and thickness 6 mm . On the other hand, we contemplated how if we increase to 3 the number of intermediate stiffeners in flat web girders we achieve a higher ultimate strength in the cases with $h_w = 1600 \text{ mm}$, not so for $h_w = 2400 \text{ mm}$, where the maximum load of the corrugated web girders always stayed above the flat web ones with 3 stiffeners.

Regarding the behavior and failure mode of the beams, a fundamental difference was observed. Flat web girders exhibited a ductile behavior before reaching ultimate strength, especially when the models analyzed had small web thicknesses, $t_w = 6 \text{ mm}$. The buckling elastic load calculated for all cases of flat web girders was found to be less than the real maximum load resisted, so it is likely that this ductility was due to the development of post-buckling resistance with the appearance of tensile membrane stresses.

On the contrary, in corrugated web girders, the failure mode observed was always the fragile shear collapse of the web. The buckling elastic load values obtained were always higher than the last resistance reached. This fact can explain such a fragile collapse, because the post-buckling resistance that gave the flat web girders some ductility was not developed. Note the exception of corrugated web girders with thickness $t_w = 12 \text{ mm}$. In this case the beams had a ductile behavior before the failure, but such behavior was not due to the development of post-buckling resistance, but to the plasticization of the flanges.

Finally, it was verified the correspondence of the formulation proposed by Eurocode EN1993-1-5 for the calculation of the Ultimate Limit State in

corrugated web girders with the results obtained in the analysis by Finite Elements carried out with ANSYS. It was concluded that Eurocode EN1993-1-5 formulation correctly predicts the failure mechanism presented by the girders. However, it was observed how the maximum values of resistance calculated are conservative, since, according to the results provided by ANSYS, the beams are capable of resisting a greater load. This difference was mainly due to the fact that the formulation of Eurocode EN1993-1-5 supposes that all the shear is only resisted by the web and all the bending moment is uniquely resisted by the flanges, when in fact, an interaction between both parts takes place.

To close this document, two Appendixes are included. In the first, the calculations made to obtain the ultimate strength of corrugated web girders according to the formulation in Eurocode EN1993-1-5 are shown in greater detail. The second reproduces the communication that will be presented at the international congress: "The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structure", which will take place in the city of Prague from September 11 to 13, 2019.

Índice

Agradecimientos	III
Resumen	V
Lista de Figuras	XIII
Lista de Tablas	XVII
Lista de Símbolos	XIX
1. Introducción	1
1.1. Vigas de gran canto con alma de chapa corrugada	1
1.2. Planteamiento del problema y objetivo del estudio	4
1.3. Contenido del documento	5
2. Estado del arte	7
2.1. Síntesis de la literatura existente.....	7
2.2. Formulación para la obtención del E.L.U. según el Eurocódigo EN1993-1-5.....	9
2.2.1. Momento de resistencia de las alas	9
2.2.2. Resistencia a cortante del alma	11
2.3. Propiedades del material a emplear en el modelo de E.F. según el Eurocódigo EN1993-1-5	11
3. Análisis por Elementos Finitos de vigas de alma corrugada	13
3.1. Descripción de la geometría.....	13
3.1.1. Dimensiones y morfología.....	13
3.1.2. Imperfecciones iniciales	15
3.2. Descripción del modelo de Elementos Finitos.....	18
3.2.1. Software y tamaño de la malla.....	18
3.2.2. Características del material empleado.....	18
3.2.3. Condiciones de contorno y aplicación de la carga/desplazamiento	19
3.3. Curvas Fuerza-Desplazamiento	20
3.4. Estudio de la rigidez	26
3.5. Estudio de la resistencia última	27

4. Análisis por Elementos Finitos de vigas de alma plana	29
4.1. Descripción de la geometría.....	29
4.1.1. Dimensiones y morfología.....	29
4.1.2. Imperfecciones iniciales.....	31
4.2. Descripción del modelo de Elementos Finitos.....	39
4.3. Curvas Fuerza-Desplazamiento	41
4.4. Estudio de la rigidez	58
4.4.1. Alma plana sin rigidizadores	59
4.4.2. Alma plana con 1 rigidizador	59
4.4.3. Alma plana con 2 rigidizadores	60
4.4.4. Alma plana con 3 rigidizadores	60
4.5. Estudio de la resistencia última	65
4.5.1. Alma plana sin rigidizadores	66
4.5.2. Alma plana con 1 rigidizador	66
4.5.3. Alma plana con 2 rigidizadores	66
4.5.4. Alma plana con 3 rigidizadores	67
5. Estudio comparativo	69
5.1. Vigas de alma plana y vigas de alma corrugada	69
5.2. Vigas de alma corrugada y Eurocódigo EN1993-1-5	76
5.2.1. Momento de resistencia de las alas	76
5.2.2. Resistencia del alma a cortante	78
6. Conclusiones	83
6.1. Conclusiones relativas a vigas de alma corrugada	83
6.2. Conclusiones relativas a vigas de alma plana.....	84
6.3. Conclusiones relativas a la comparación entre vigas de alma plana y vigas de alma corrugada.....	84
6.4. Conclusiones relativas a la comparación de los resultados obtenidos en el análisis por E.F. de vigas de alma corrugada y el Eurocódigo EN1993-1-5	85
A. Cálculos realizados para la obtención del Estado Límite Último según el Eurocódigo EN1993-1-5 en vigas de alma corrugada.	87
A.1. Momento de resistencia de las alas	87
A.2. Resistencia a cortante del alma	89
B. Comunicación para al congreso “The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structure, SDSS, 2019, Prague, 11-13 September”	91
Bibliografía	101

Lista de Figuras

1.		
1.1.	Puente de Cognac, primer puente de vigas corrugadas. Fuente: www.theconstructor.org/structural-engg/corrugated-webs-in-bridge-girders	1
1.2.	Vigas corrugadas en puentes. Fuente: Kövesdi et al [10].....	1
1.3.	Vigas corrugadas en edificios industriales. Fuente: Kövesdi et al [10].....	2
1.4.	Viga de alma corrugada trapezoidal. Fuente: Kövesdi et al [11].....	2
1.5.	Viga de alma corrugada sinusoidal. Fuente: www.kssl.ie/about/kssl-expansion-projects/sin-beam-new	2
1.6.	Puente de Maupré, viga corrugada prismática. Fuente: Hassanein and Kharoob [8]	3
1.7.	Puente de Dole, viga corrugada altura h_w variable. Fuente: Zeballos et al. [21]	3
1.8.	Puente de Kurobegawa. Fuente: Zeballos [22].....	3
2.		
2.1.	Distribución de fuerzas debidas al cortante para el cálculo del momento transversal. Fuente: Kövesdi et al. [11].....	10
2.2.	Modelo de comportamiento material elasto-plástico con endurecimiento por deformación lineal según Eurocódigo EN1993-1-5	12
3.		
3.1.	Parámetros propios de vigas de alma corrugada	13
3.2.	Vista general viga alma corrugada con malla empleada en el estudio	15
3.3.	Primer modo de pandeo. Viga 1600-6.....	16
3.4.	Primer modo de pandeo. Viga 1600-9.....	16
3.5.	Primer modo de pandeo. Viga 1600-12.....	16
3.6.	Primer modo de pandeo. Viga 2400-6.....	17
3.7.	Primer modo de pandeo. Viga 2400-9.....	17
3.8.	Primer modo de pandeo. Viga 2400-12.....	17
3.9.	Curva tensión deformación acero S-355 empleado.....	19
3.10.	Vista de los elementos con limitaciones de movimiento en viga alma corrugada.....	20
3.11.	Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma corrugada $h=1600$	21
3.12.	Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma corrugada $h=2400$	21
3.13.	Distribución de tensiones viga alma corrugada 1600-6 bajo carga máxima	23

3.14.	Distribución de tensiones viga alma corrugada 1600-9 bajo carga máxima	23
3.15.	Distribución de tensiones viga alma corrugada 1600-12 bajo carga máxima	24
3.16.	Distribución de tensiones viga alma corrugada 2400-6 bajo carga máxima	24
3.17.	Distribución de tensiones viga alma corrugada 2400-9 bajo carga máxima	25
3.18.	Distribución de tensiones viga alma corrugada 2400-12 bajo carga máxima	25
3.19.	Curvas Fuera-Desplazamiento de todas las vigas de alma corrugada	27
4.		
4.1.	Vista general viga alma plana con malla empleada en el estudio	31
4.2.	Primer modo de pandeo. Viga 1600-6. 0 rig	31
4.3.	Primer modo de pandeo. Viga 1600-9. 0 rig	32
4.4.	Primer modo de pandeo. Viga 1600-12. 0 rig	32
4.5.	Primer modo de pandeo. Viga 2400-6. 0 rig	32
4.6.	Primer modo de pandeo. Viga 2400-9. 0 rig	33
4.7.	Primer modo de pandeo. Viga 2400-12. 0 rig	33
4.8.	Primer modo de pandeo. Viga 1600-6. 1 rig	33
4.9.	Primer modo de pandeo. Viga 1600-9. 1 rig	34
4.10.	Primer modo de pandeo. Viga 1600-12. 1 rig	34
4.11.	Primer modo de pandeo. Viga 2400-6. 1 rig	34
4.12.	Primer modo de pandeo. Viga 2400-9. 1 rig	35
4.13.	Primer modo de pandeo. Viga 2400-12. 1 rig	35
4.14.	Primer modo de pandeo. Viga 1600-6. 2 rig	35
4.15.	Primer modo de pandeo. Viga 1600-9. 2 rig	36
4.16.	Primer modo de pandeo. Viga 1600-12. 2 rig	36
4.17.	Primer modo de pandeo. Viga 2400-6. 2 rig	36
4.18.	Primer modo de pandeo. Viga 2400-9. 2 rig	37
4.19.	Primer modo de pandeo. Viga 2400-12. 2 rig	37
4.20.	Primer modo de pandeo. Viga 1600-6. 3 rig	37
4.21.	Primer modo de pandeo. Viga 1600-9. 3 rig	38
4.22.	Primer modo de pandeo. Viga 1600-12. 3 rig	38
4.23.	Primer modo de pandeo. Viga 2400-6. 3 rig	38
4.24.	Primer modo de pandeo. Viga 2400-9. 3 rig	39
4.25.	Primer modo de pandeo. Viga 2400-12. 3 rig	39
4.26.	Vista de los elementos con limitaciones de movimiento en viga de alma plana	40
4.27.	Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 0 rigidizadores. h=1600	41

4.28. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 0 rigidizadores. h=2400	42
4.29. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 1 rigidizador. h=1600	42
4.30. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 1 rigidizador. h=2400	43
4.31. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 2 rigidizadores. h=1600	43
4.32. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 2 rigidizadores. h=2400	44
4.33. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 3 rigidizadores. h=1600	44
4.34. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 3 rigidizadores. h=2400	45
4.35. Distribución de tensiones viga alma plana 0 rig 1600-6 bajo carga máxima	46
4.36. Distribución de tensiones viga alma plana 0 rig 1600-9 bajo carga máxima	46
4.37. Distribución de tensiones viga alma plana 0 rig 1600-12 bajo carga máxima	47
4.38. Distribución de tensiones viga alma plana 0 rig 2400-6 bajo carga máxima	47
4.39. Distribución de tensiones viga alma plana 0 rig 2400-9 bajo carga máxima	48
4.40. Distribución de tensiones viga alma plana 0 rig 2400-12 bajo carga máxima	48
4.41. Distribución de tensiones viga alma plana 1 rig 1600-6 bajo carga máxima	49
4.42. Distribución de tensiones viga alma plana 1 rig 1600-9 bajo carga máxima	49
4.43. Distribución de tensiones viga alma plana 1 rig 1600-12 bajo carga máxima	50
4.44. Distribución de tensiones viga alma plana 1 rig 2400-6 bajo carga máxima	50
4.45. Distribución de tensiones viga alma plana 1 rig 2400-9 bajo carga máxima	51
4.46. Distribución de tensiones viga alma plana 1 rig 2400-12 bajo carga máxima	51
4.47. Distribución de tensiones viga alma plana 2 rig 1600-6 bajo carga máxima	52
4.48. Distribución de tensiones viga alma plana 2 rig 1600-9 bajo carga máxima	52
4.49. Distribución de tensiones viga alma plana 2 rig 1600-12 bajo carga máxima	53

4.50.	Distribución de tensiones viga alma plana 2 rig 2400-6 bajo carga máxima	53
4.51.	Distribución de tensiones viga alma plana 2 rig 2400-9 bajo carga máxima	54
4.52.	Distribución de tensiones viga alma plana 2 rig 2400-12 bajo carga máxima	54
4.53.	Distribución de tensiones viga alma plana 3 rig 1600-6 bajo carga máxima	55
4.54.	Distribución de tensiones viga alma plana 3 rig 1600-9 bajo carga máxima	55
4.55.	Distribución de tensiones viga alma plana 3 rig 1600-12 bajo carga máxima	56
4.56.	Distribución de tensiones viga alma plana 3 rig 2400-6 bajo carga máxima	56
4.57.	Distribución de tensiones viga alma plana 3 rig 2400-9 bajo carga máxima	57
4.58.	Distribución de tensiones viga alma plana 3 rig 2400-12 bajo carga máxima	57
4.59.	Aspecto viga alma plana antes del colapso	58
4.60.	Aspecto viga alma plana después del colapso	58
4.61.	Comparativa vigas 1600-6 con diferente número de rigidizadores	62
4.62.	Comparativa vigas 1600-9 con diferente número de rigidizadores	63
4.63.	Comparativa vigas 1600-12 con diferente número de rigidizadores	63
4.64.	Comparativa vigas 2400-6 con diferente número de rigidizadores	64
4.65.	Comparativa vigas 2400-9 con diferente número de rigidizadores	64
4.66.	Comparativa vigas 2400-12 con diferente número de rigidizadores	65
 5.		
5.1.	Comparativa vigas alma plana y corrugada 1600-6	69
5.2.	Comparativa vigas alma plana y corrugada 1600-9	70
5.3.	Comparativa vigas alma plana y corrugada 1600-12	70
5.4.	Comparativa vigas alma plana y corrugada 2400-6	72
5.5.	Comparativa vigas alma plana y corrugada 2400-9	72
5.6.	Comparativa vigas alma plana y corrugada 2400-12	73
5.7.	Disposición de las fuerzas F debidas al cortante en vigas de alma corrugada	77
5.8.	Distribución de tensiones en las alas de la viga	78

Lista de Tablas

3.

3.1.	Parámetros empleados en vigas de alma corrugada	14
3.2.	Características del material empleado.....	18
3.3.	Condiciones de contorno viga de alma corrugada.....	19
3.4.	Rigideces vigas de alma corrugada con $h=1600$	26
3.5.	Rigideces vigas de alma corrugada con $h=2400$	26
3.6.	Carga máxima vigas de alma corrugada con $h=1600$	27
3.7.	Carga máxima vigas de alma corrugada con $h=2400$	28

4.

4.1.	Parámetros empleados en vigas de alma plana.....	30
4.2.	Condiciones de contorno viga de alma plana	41
4.3.	Rigideces vigas de alma plana, 0 rigidizadores y $h=1600$	59
4.4.	Rigideces vigas de alma plana, 0 rigidizadores y $h=2400$	59
4.5.	Rigideces vigas de alma plana, 1 rigidizador y $h=1600$	59
4.6.	Rigideces vigas de alma plana, 1 rigidizador y $h=2400$	59
4.7.	Rigideces vigas de alma plana, 2 rigidizadores y $h=1600$	60
4.8.	Rigideces vigas de alma plana, 2 rigidizadores y $h=2400$	60
4.9.	Rigideces vigas de alma plana, 3 rigidizadores y $h=1600$	60
4.10.	Rigideces vigas de alma plana, 3 rigidizadores y $h=2400$	60
4.11.	Variación de las rigideces entre en instante inicial y $\delta = 10$ mm	61
4.12.	Tabla comparativa valores de la rigidez para $\delta = 10$ mm	65
4.13.	Carga máxima vigas de alma plana, 0 rigidizadores y $h=1600$	66
4.14.	Carga máxima vigas de alma plana, 0 rigidizadores y $h=2400$	66
4.15.	Carga máxima vigas de alma plana, 1 rigidizador y $h=1600$	66
4.16.	Carga máxima vigas de alma plana, 1 rigidizador y $h=2400$	66
4.17.	Carga máxima vigas de alma plana, 2 rigidizadores y $h=1600$	67
4.18.	Carga máxima vigas de alma plana, 2 rigidizadores y $h=2400$	67
4.19.	Carga máxima vigas de alma plana, 3 rigidizadores y $h=1600$	67
4.20.	Carga máxima vigas de alma plana, 3 rigidizadores y $h=2400$	67
4.21.	Incremento porcentual de la carga máxima a pasar de 0 a 3 rigidizadores	68

5.

5.1.	Comparativa cargas máximas vigas alma corrugada , 0 y 3 rigidizadores, $h_w = 1600$ mm.....	71
5.2.	Comparativa rigideces vigas alma corrugada y 3 rigidizadores, $h_w = 1600$ mm.....	71
5.3.	Comparativa cargas máximas vigas alma corrugada , 0 y 3 rigidizadores, $h_w = 2400$ mm.....	73

5.4.	Comparativa rigideces vigas alma corrugada y 3 rigidizadores, $h_w = 2400$ mm	74
5.5.	Comparativa carga elástica de pandeo y carga última vigas alma plana 0 rig	75
5.6.	Comparativa carga elástica de pandeo y carga última vigas alma plana 1 rig	75
5.7.	Comparativa carga elástica de pandeo y carga última vigas alma plana 2 rig	75
5.8.	Comparativa carga elástica de pandeo y carga última vigas alma plana 3 rig	75
5.9.	Comparativa carga elástica de pandeo y carga última vigas corrugadas.....	76
5.10.	Carga máxima soportada por las alas según Eurocódigo EN1993-1-5	78
5.11.	Carga máxima soportada por el alma según Eurocódigo EN1993-1-5	80
5.12.	Comparativa cargas últimas Eurocódigo EN1993-1-5 y ANSYS	80
 A.		
A.1.	Valores intermedios para el cálculo del área reducida	87
A.2.	Proceso iterativo para $h_w = 1600$ mm	88
A.3.	Proceso iterativo para $h_w = 2400$ mm	88
A.4.	Valores intermedios para el cálculo del factor de reducción por pandeo local	89
A.5.	Valores intermedios para el cálculo del factor de reducción por pandeo global	89

Lista de Símbolos

Constantes

f_T	Factor de reducción límite elástico	-
χ_c	Factor de reducción por pandeo	-
$\chi_{c,l}$	Factor de reducción para pandeo local	-
$\chi_{c,g}$	Factor de reducción para pandeo global	-
ρ	Factor de reducción área efectiva	-
K_σ	Factor de pandeo	-

Geometría

a_1	Longitud del panel paralelo	<i>mm</i>
a_2	Longitud del panel inclinado	<i>mm</i>
a_3	Longitud proyección vertical panel inclinado	<i>mm</i>
a_4	Longitud proyección horizontal panel inclinado	<i>mm</i>
h_w	Altura del alma	<i>mm</i>
t_w	Espesor del alma	<i>mm</i>
b_f	Anchura de las alas	<i>mm</i>
t_f	Espesor de las alas	<i>mm</i>
b_s	Anchura de los rigidizadores	<i>mm</i>
t_s	Espesor de los rigidizadores	<i>mm</i>
a	Distancia entre rigidizador central y laterales en vigas de alma corrugada	<i>mm</i>
L_{total}	Longitud total vigas de alma plana y corrugadas	<i>mm</i>

L	Distancia entre los dos rigidizadores laterales extremos	mm
δ	Desplazamiento a lo largo de un eje coordenado	mm
θ	Giro alrededor de un eje coordenado	-
N_{rig}	Numero de rigidizadores intermedios a cada lado del rigidizador central fijo	-
$\overline{\lambda_{c,l}}$	Esbeltez reducida pandeo local	-
$\overline{\lambda_{c,g}}$	Esbeltez reducida pandeo global	-
$\overline{\lambda_p}$	Esbeltez reducida pandeo para cálculo del factor de reducción del área efectiva	-
I_z	Segundo momento del área con respecto al eje Z	mm^4
w	Longitud proyectada de media onda corrugada	mm
s	Longitud total de media onda corrugada	mm

Propiedades del material

σ_y, f_y	Tensión límite elástico	MPa
$f_{y,r}$	Tensión límite elástico reducido	MPa
σ_u	Tensión última	MPa
E	Módulo de Young	MPa
ν	Módulo de Poisson	-
E_T	Módulo zona plástica	MPa
ρ	Densidad	Kg/m^3
ε	Tensión límite elástico normalizada	-

Fuerza y Tensión

$R_{inicial}$	Rigidez inicial	KN/mm
$R_{L/1000}$	Rigidez para un desplazamiento de 10 mm	KN/mm
F_u	Carga máxima/ última	KN
$M_{y,Rd}$	Momento de resistencia de las alas	$N \times mm$
M_z	Momento transversal en vigas de alma corrugada	$N \times mm$
$\sigma_x(M_z)$	Tensión en las alas debido al momento transversal	MPa
F	Fuerza desarrollada en el contacto entre las alas y los bordes superior e inferior del alma	KN
V	Cortante que actúa sobre la viga	KN
P	Fuerza vertical aplicada en el centro luz de la viga	KN
$V_{bw,Rd}$	Resistencia a cortante del alma	KN
$\tau_{cr,l}$	Tensión crítica de pandeo local a cortante	MPa
$\tau_{cr,g}$	Tensión crítica de pandeo global a cortante	MPa

Otros

N	Número de casos estudiados (vigas de alma plana)	-
D_x	Rigidez a flexión de una placa en el eje X	$N \times mm$
D_z	Rigidez a flexión de una placa en el eje Z	$N \times mm$

Capítulo 1. Introducción.

1.1 Vigas de gran canto con alma de chapa corrugada

Las vigas de gran canto con alma de chapa corrugada han sido ampliamente empleadas en el mundo de la ingeniería civil y de la construcción en los últimos años.

Los primeros usos de chapas de acero corrugadas con función estructural se remontan a comienzos del siglo XX, sin embargo, no será hasta 1986 cuando tenga lugar su primera aparición significativa en el campo de la ingeniería civil, concretamente, en el puente de Cognac en Francia, Figura 1.1.



Figura 1.1. Puente de Cognac, primer puente de vigas corrugadas. Fuente: www.theconstructor.org/structural-engg/corrugated-webs-in-bridge-girders

A partir de este momento el uso de esta tipología de vigas con alma de chapa corrugada no ha hecho más que aumentar propiciado en parte por el desarrollo de procesos automáticos de fabricación del alma corrugada y de la soldadura. Podemos establecer dos campos de aplicación principales: por un lado, estructuras de puentes, Figura 1.2, y por otro, construcciones comerciales e industriales, Figura 1.3.



Figura 1.2. Vigas corrugadas en puentes. Fuente: Kövesdi et al [10]



Figura 1.3. Vigas corrugadas en edificios industriales. Fuente: Kövesdi et al [10]

No obstante, cabe destacar que su distribución geográfica no es uniforme, ya que los principales ejemplos de uso de estas vigas se encuentran en el Extremo Oriente en países como Japón, China o Corea, y en Francia o Alemania en el caso de Europa; países de los cuales proceden la mayor parte de los estudios existentes sobre las mismas.

La principal ventaja de las vigas de alma corrugada frente a las convencionales consiste básicamente en que poseen una capacidad portante mayor, son capaces de resistir la misma carga externa empleando una menor cantidad de material por lo que se reduce significativamente su peso. Cuentan, además, con una resistencia al pandeo por cortante superior, así como una mayor rigidez lateral.

Existe una gran variedad de criterios de clasificación. Los más importantes son según la forma de las corrugas y según la variación de la altura del alma.

Según la forma de las corrugas encontramos dos tipos principales: trapezoidales y sinusoidales. En las trapezoidales, Figura 1.4, las corrugas tienen forma de trapecios por lo que todos los subpaneles que las componen son planos. En las sinusoidales, Figura 1.5, el alma consiste en un gran panel ondulado con formas curvas. En nuestro estudio trabajaremos con vigas de alma corrugada trapezoidales.



Figura 1.4. Viga de alma corrugada trapezoidal. Fuente: Kövesdi et al [11]



Figura 1.5. Viga de alma corrugada sinusoidal. Fuente: www.kssl.ie/about/kssl-expansion-projects/sin-beam-new

Por otro lado, según la variación de la altura del alma, h_w , tenemos vigas con altura del alma constante o prismáticas, Figura 1.6; y vigas con altura del alma variable a lo largo del eje longitudinal de la viga, Figuras 1.7 y 1.8. Nos centraremos en este estudio en el primer tipo, las vigas en las cuales la altura del alma no varía.



Figura 1.6. Puente de Maupré, viga corrugada prismática. Fuente: Hassanein and Kharoob [8]



Figura 1.7. Puente de Dole, viga corrugada altura h_w variable. Fuente: Zeballos et al. [21]



Figura 1.8. Puente de Kurobegawa. Fuente: Zeballos [22]

En definitiva, las vigas objeto de nuestro estudio son aquellas constituidas por alma corrugada trapezoidal y altura h_w constante.

1.2 Planteamiento del problema y objetivo del estudio

Es conocido que el uso de vigas de alma corrugada frente a vigas de alma plana supone un incremento en la resistencia última de las mismas, sin embargo, se observa que no existe una gran cantidad de información acerca del valor de dicho incremento.

Igualmente, encontramos cierta carencia en cuanto a estudios sobre los efectos derivados del uso de vigas de alma corrugada frente a las vigas de alma plana convencionales, y es que, el incremento de la resistencia última que se logra, implica, por el contrario, una pérdida de ductilidad, por lo que el modo de fallo habitual suele ser el colapso frágil. Es importante destacar que la ductilidad desarrollada por las vigas de alma plana es, en gran medida, debida al desarrollo de resistencia post-pandeo con la aparición de tensiones de membrana de tracción y en las vigas de alma corrugada no se desarrolla tal resistencia.

Como continuación al trabajo iniciado por Valledado [1] en el que estudia la carga de pandeo de vigas de alma corrugada y su correlación con vigas de alma plana, en este documento se analiza, por un lado, la resistencia última de vigas de alma corrugada trapezoidal, recogiendo la curva Fuerza-Desplazamiento de las mismas hasta el colapso; y por otro, se realiza una comparación entre el comportamiento de las vigas de alma corrugada y el de las vigas de alma plana con los mismos valores de espesor y altura del alma pero diferente número de rigidizadores intermedios: 0, 1, 2 y 3.

Tratamos por tanto de comprobar si aumentando el número de rigidizadores intermedios en vigas de alma plana de 0 a 3 logramos llegar a alcanzar el valor de la resistencia última que presentan las vigas de alma corrugada sin el añadido de rigidizadores adicionales. Los resultados muestran como la resistencia última de vigas de alma plana con 3 rigidizadores puede llegar a ser similar a la de las corrugadas.

Finalmente, en este estudio se realiza una comparación entre los valores de las cargas últimas obtenidas en el análisis por elementos finitos para vigas de alma corrugada y los valores calculados según la formulación propuesta por el Eurocódigo EN1993-1-5 a fin de conocer el grado de correspondencia de dicha formulación con los resultados analíticos. Se observa como los valores calculados según el Eurocódigo EN1993-1-5 son conservadores en comparación con los valores de carga máxima obtenidos con el programa ANSYS.

1.3 Contenido del documento

El documento se estructura en una sucesión de Capítulos seguidos de una serie de Anexos finales.

En primer lugar, en el Capítulo 1, se realiza una introducción general al contenido del documento. Dicha introducción consiste en una exposición de las principales características y aplicaciones de las vigas de gran canto con alma de chapa corrugada, el planteamiento del problema y objetivo del estudio y un resumen de la estructura del documento.

Después, en el Capítulo 2, se recoge de forma sintetizada la literatura existente hasta el momento relacionada con el tema de estudio que diversos autores han elaborado. En dicho capítulo se realiza además un resumen de la formulación propuesta por el Eurocódigo EN1993-1-5 para el cálculo del Estado Límite Último (ELU).

A continuación, encontramos el Capítulo 3, que abarca el análisis por elementos finitos de vigas de alma corrugada, y el Capítulo 4, que trata sobre el análisis por elementos finitos de las diferentes tipologías de vigas de alma plana.

En estos capítulos es donde se concentra la mayor cantidad de la información obtenida con el programa ANSYS. Ambos capítulos se articulan de un modo similar: comienzan con la descripción de la geometría de la viga a estudiar: tanto sus dimensiones generales como las imperfecciones iniciales impuestas; y prosiguen con una descripción del modelo de elementos finitos empleado: software y tamaño de la malla, características del material, condiciones de contorno y procedimiento de aplicación de la carga/desplazamiento. A continuación, se recogen las curvas Fuerza-Desplazamiento obtenidas, así como una sucesión de imágenes con el aspecto que presentaban las diferentes vigas analizadas bajo carga máxima. Por último, los dos capítulos finalizan con una interpretación de los valores de rigidez y resistencia última extraídos de las gráficas previamente expuestas.

El Capítulo 5 es, sin duda, uno de los más importantes de nuestro estudio pues en él se realiza la comparación entre las vigas de alma corrugada y las vigas de alma plana con diferente número de rigidizadores intermedios. En este capítulo se calcula también la carga máxima que pueden aguantar las vigas de alma corrugada consideradas según el Eurocódigo EN1993-1-5, y se comparan dichos cálculos con los resultados obtenidos en el análisis por elementos finitos. En el Anejo A pueden contemplarse con mayor grado de detalle los cálculos realizados.

Finalmente, en el Capítulo 6, se realiza un resumen con las conclusiones más relevantes que se han ido presentando a lo largo del documento. El capítulo de conclusiones se divide en cuatro apartados: conclusiones relativas a las vigas de alma corrugada, conclusiones relativas a las vigas de alma plana, conclusiones relativas a la comparación de las dos tipologías de vigas entre sí y, por último, conclusiones relativas a la comparación de las vigas de alma corrugada con los valores del Eurocódigo EN1993-1-5.

Adicionalmente, se incluye en el Anejo B, al final del presente trabajo, una reproducción de la comunicación elaborada para el congreso internacional: “The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structure”, que se celebrará en la ciudad de Praga del 11 al 13 de Septiembre de 2019.

Capítulo 2. Estado del arte

2.1 Síntesis de la literatura existente

Durante las últimas dos décadas el uso de vigas de alma corrugada ha crecido considerablemente, y, ligado a ello, el número de estudios y documentos relativos a las mismas.

Hasan et al. [2] han elaborado recientemente un trabajo consistente en una recopilación de los principales artículos que existen sobre el uso de chapa corrugada en estructuras de acero y mixtas. Se incluyen un total de 142 artículos publicados, mayoritariamente, a partir del año 2000. Muchos de los artículos que se van a mencionar a continuación aparecen recogidos en dicho trabajo.

Entre los primeros estudios encontramos el realizado por Luo and Edlund [3] en 1996, los cuales analizaron la resistencia a cortante de vigas de alma corrugada trapezoidal a través de un modelo de elementos finitos no lineal. Entre otros aspectos, el estudio llegó a la conclusión de que la profundidad de las corrugas del alma, h , no tiene un efecto relevante en la capacidad última del alma a cortante.

En los dos años siguientes, en 1997 y 1998, Elgaaly et al. [4] y Elagaaly and Seshadri [5] presentaron un completo y exhaustivo estudio experimental sobre vigas de alma corrugada trapezoidal de perfil soldado sometidas a flexión y cortante hasta llegar al colapso.

Ya en fechas más recientes e, igualmente, con una componente experimental significativa, encontramos el trabajo de Leblouba et al.[6], quienes propusieron una formulación normalizada para el cálculo de la resistencia a cortante de vigas de alma corrugada trapezoidal y compararon las distintas formulaciones analíticas de la resistencia a cortante existentes.

Del mismo modo, Moon et al. [7] propusieron un criterio de diseño para para vigas de alma corrugada trapezoidal y llevaron a cabo una serie de estudios experimentales para verificar las ecuaciones propuestas.

Por su parte, M.F. Hassanein and O.F. Kharoob investigaron en [8] el comportamiento real que tiene la junta entre las alas y el alma corrugada en vigas de puentes. Para ello se creó un modelo de elementos finitos con dos variantes: unión alma-alas articulada y unión alma-alas empotrada. Los resultados concluyeron que el comportamiento real de dicha junta podía considerarse prácticamente un empotramiento. El estudio concluyó también que cuando las alas son suficientemente rígidas, $t_f/t_w \geq 3$, la viga presenta

un mecanismo de fallo por cortante, y que si, por el contrario, el alma corrugada tiene una rigidez elevada, la resistencia de la viga pasa a estar controlada por la deformación de las alas.

A M.F. Hassanein and O.F. Kharoob pertenece también el estudio experimental y teórico [9] realizado en vigas de puentes con alma de chapa corrugada trapezoidal. El estudio reveló que las formulaciones existentes para el cálculo de la resistencia a cortante tienen carácter conservador.

Es importante destacar igualmente el grupo de trabajo compuesto por B. Kövesdi, B. Jáger y L.Dunai. Este equipo realizó en [10] un estudio teórico-experimental sobre el comportamiento de vigas de alma corrugada trapezoidal sometidas a la acción combinada de esfuerzos de cortante, flexión y cargas puntuales, haciendo hincapié tanto en el comportamiento del alma corrugada como en el pandeo de las alas.

Además, este grupo realizó en [11] un análisis del momento transversal que se produce en las alas de vigas de alma corrugada. Dicho momento es debido al esfuerzo cortante en el alma corrugada y su valor es función de la geometría del perfil corrugado. El momento transversal genera una variación en la distribución de tensiones en el ala, lo cual, implica una disminución de la resistencia global de la viga. En este estudio se trató de analizar la tendencia y efecto de este momento. Finalmente, se propuso un método tanto para la determinación del momento transversal como de las tensiones normales adicionales que dicho momento genera en las alas.

En lo que se refiere a vigas de alma corrugada sinusoidal, Pasternak and Kubieniec [12] llevaron a cabo una investigación experimental y plantearon nuevas fórmulas para la resistencia al pandeo lateral por torsión.

El grupo de investigación compuesto por H.H. Abbas, R. Sause y R.G. Driver propuso en [13,14,15] un método analítico directo para la determinación del estado tensional de vigas de alma corrugada sometidas a flexión.

Aunque menos numerosos, también hubo estudios de vigas de alma corrugada con uniones diferentes a la convencional unión soldada ala-alma. Así encontramos el trabajo de Dubina [16] que estudió el comportamiento estructural de vigas de alma corrugada con uniones atornilladas espaciadas.

Como se expuso en el primer capítulo, existen vigas corrugadas prismáticas o de sección constante y vigas corrugadas de sección variable. Aunque sean las primeras las que van a ser objeto de nuestro trabajo, es importante destacar la labor que realizaron Zeballos et al. [17] en el estudio de las segundas. Estos analizaron la resistencia última a cortante de vigas de alma

corrugada trapezoidal con altura h_w variable presentes en apoyos de puentes a través de un modelo de elementos finitos no lineal. Entre otras, llegaron a la conclusión de que el espesor del alma, t_w , tiene un efecto significativo en la resistencia a cortante y que el fallo tiene lugar de forma diferente en función del mismo. Estos hechos van a poder ser observados nuevamente en nuestro estudio, pero, en este caso, para vigas de sección constante.

Por otro lado, encontramos estudios que, aunque no estén realizados con vigas de alma corrugada, analizan la resistencia de vigas de acero de gran canto bajo los efectos combinados de flector y cortante.

Así, en esta línea, Sinur and Beg [18,19] investigaron la resistencia de vigas de alma plana con rigidizadores longitudinales y transversales a través de un trabajo tanto numérico como experimental.

Moghadam [20] estudió la resistencia última de vigas de gran canto a través de la evaluación de una serie de secciones de viga de longitud reducida constituidas por paneles esbeltos soldados. Como resultado del estudio se propuso una nueva fórmula para la resistencia última de vigas esbeltas sometidas a la acción combinada de flector y cortante.

En este contexto, tal y como se ha explicado en el Capítulo 1, en el presente documento se estudiará la resistencia última de vigas de alma corrugada trapezoidal y se compararan los resultados obtenidos con los de vigas de alma plana con diferente número de rigidizadores intermedios. La geometría de las vigas de alma corrugada que constituyeron nuestro modelo de elementos finitos fue similar a la empleada por Hassanein and Kharoob en [8, 9].

2.2 Formulación para la obtención del E.L.U. según el Eurocódigo EN1993-1-5

El Eurocódigo EN1993-1-5 recoge la formulación necesaria para el cálculo de la resistencia última de vigas de alma corrugada. Dicha formulación se basa en el cálculo, por un lado, del momento de resistencia máximo de las alas, y por otro, de la resistencia máxima a cortante del alma. La resistencia última de la viga considerada será, por tanto, igual al menor de los dos valores obtenidos.

2.2.1 Momento de resistencia de las alas

Para el cálculo del momento de resistencia de las alas el Eurocódigo EN1993-1-5 propone la siguiente expresión:

$$M_{y,Rd} = \frac{b_f \times t_f \times f_{yf,r}}{\gamma_{M0}} \times (h_w + t_f) \quad (2.2)$$

donde $f_{yf,r}$ es el valor del límite elástico reducido debido a los momentos transversales que en las vigas de alma corrugada se producen en las alas:

$$f_{yf,r} = f_{yf} \times f_T \quad (2.3)$$

El factor de reducción del límite elástico se obtiene de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$f_T = 1 - 0,4 \times \sqrt{\frac{\sigma_x(M_z)}{\frac{f_{yf}}{\gamma_{M0}}}} \quad (2.4)$$

Como podemos observar, el Eurocódigo EN1993-1-5 ya contempla la reducción en la resistencia global de las alas que el momento transversal genera, sin embargo, no aporta una expresión para el cálculo directo de dicho momento transversal. No obstante, tal y como pudimos ver en el apartado anterior, diversos autores, entre los que se encuentran Kövesdi et al. [11], analizaron la tendencia y evolución de este momento y propusieron una expresión para calcular directamente su valor máximo:

$$M_{z,max} = \frac{V \times a_3}{2 \times h_w} \times (2 \times a_1 + a_4) \quad (2.5)$$

La distribución de fuerzas que debidas al cortante son tenidas en cuenta para su obtención pueden contemplarse en la siguiente Figura 2.1:

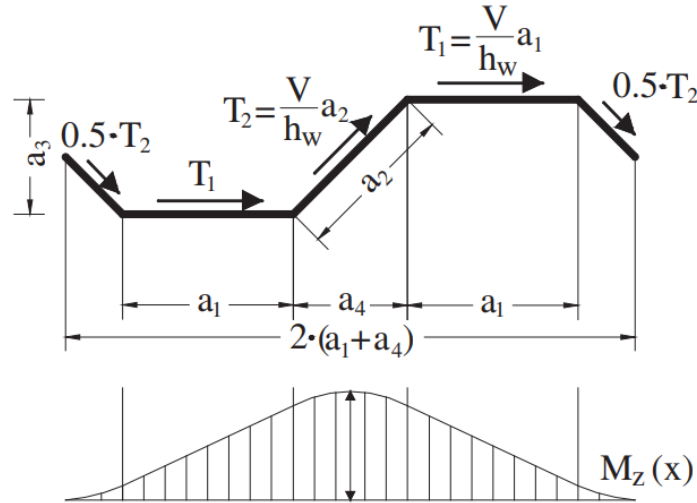


Figura 2.1. Distribución de fuerzas debidas al cortante para el cálculo del momento transversal. Fuente: Kövesdi et al. [11]

Esta expresión será la utilizada para el cálculo del momento transversal máximo, como podremos apreciar a lo largo de este documento.

2.2.2 Resistencia a cortante del alma

La resistencia a cortante del alma según el Eurocódigo EN1993-1-5 se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$V_{bw,Rd} = \chi_c \times \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1} \times \sqrt{3}} \times h_w \times t_w \quad (2.6)$$

donde χ_c es el menor de los factores de reducción obtenidos para pandeo local, $\chi_{c,l}$, o para pandeo global, $\chi_{c,g}$.

El factor de reducción para pandeo local, $\chi_{c,l}$, debe calcularse a partir de las siguientes expresiones:

$$\chi_{c,l} = \frac{1,15}{0,9 + \bar{\lambda}_{c,l}} \leq 1,0 \quad (2.7)$$

donde

$$\bar{\lambda}_{c,l} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,l} \times \sqrt{3}}} \quad (2.8)$$

y

$$\tau_{cr,l} = 4,83 \times E \times \left[\frac{t_w}{a_1} \right]^2 \quad (2.9)$$

Por otro lado, el factor de reducción para pandeo global debe obtenerse como:

$$\chi_{c,g} = \frac{1,5}{0,5 + \bar{\lambda}_{c,g}^2} \leq 1,0 \quad (2.10)$$

donde

$$\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,g} \times \sqrt{3}}} \quad (2.11)$$

y

$$\tau_{cr,g} = \frac{32,4}{t_w \times h_w^2} \times \sqrt[4]{D_x \times D_z^3} \quad (2.12)$$

2.3 Propiedades del material a emplear en el modelo de E.F. según el Eurocódigo EN1993-1-5

El Eurocódigo EN1993-1-5 recoge una serie de suposiciones acerca del comportamiento que debe tener el material que constituya el modelo de Elementos Finitos.

Se contemplan cuatro posibles modelos de comportamiento: elasto-plástico sin endurecimiento por deformación, elasto-plástico con pendiente de meseta de fluencia, elasto-plástico con endurecimiento por deformación lineal y curva tensión-deformación real modificada.

La elección de uno u otro depende del grado de precisión requerido para el análisis. En nuestro caso, se adoptó para el material un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento por deformación lineal cuya curva tensión-deformación debía ceñirse al modelo representado en la Figura 2.2:

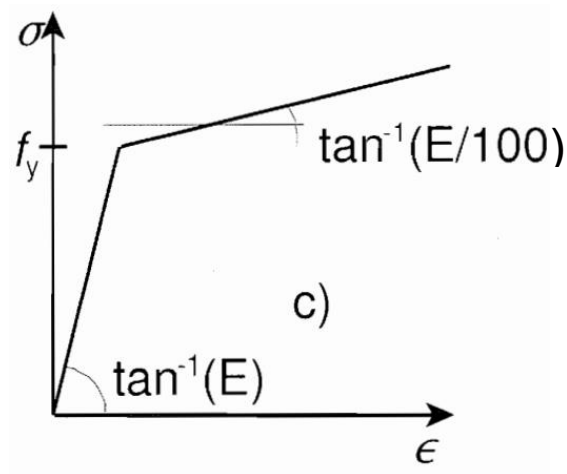


Figura 2.2. Modelo de comportamiento material elasto-plástico con endurecimiento por deformación lineal según Eurocódigo EN1993-1-5

Capítulo 3. Análisis por Elementos Finitos de vigas de alma corrugada.

3.1 Descripción de la geometría

3.1.1 Dimensiones y morfología

Procederemos en primer lugar a describir la geometría de las vigas de alma corrugada empleadas en el ensayo. Nuestro modelo de viga de alma corrugada se basa en el presentado por Hassanein and Kharoob en [9]. Para la longitud del panel paralelo a_1 se tomó el valor de 325 mm. Dicho valor se corresponde con un valor medio fruto del estudio de una serie de vigas corrugadas ya empleadas en puentes, realizado por Hassanein and Kharoob en [8]. Para la longitud del panel inclinado, a_2 , se tomó igualmente el valor de 325 mm, resultando, por tanto, una relación a_1/a_2 de 1. El valor de $a_3=175$ mm se corresponde también con un valor medio de vigas ya existentes. Finalmente, y como consecuencia de todos los demás valores adoptados, la longitud de la proyección horizontal a_4 resultó ser de 275 mm.

En la Figura 3.1 podemos ver todas las dimensiones hasta ahora comentadas.

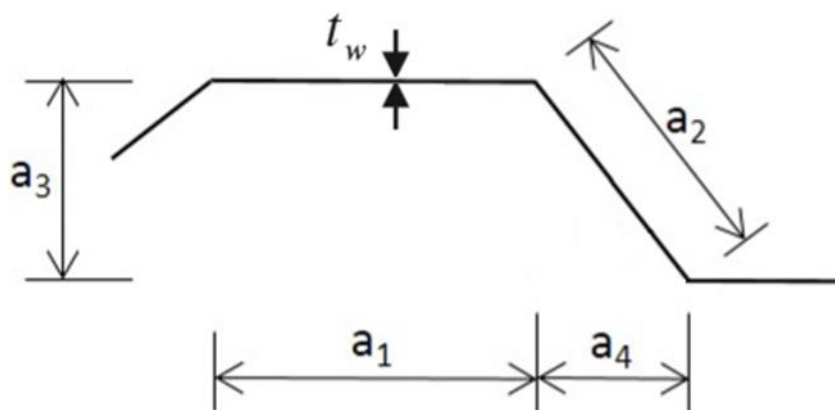


Figura 3.1. Parámetros propios de vigas de alma corrugada

Para las dimensiones de las alas se adoptaron, siguiendo los pasos realizados por Hassanein and Kharoob en [9], los valores de 500 mm para la anchura y 50 mm para el espesor. Este último valor fue adoptado tratando de asegurar en todo momento $t_f/t_w \geq 3$, pues según recoge Hassanein and Kharoob en [1], si se cumple esta relación las alas

pueden considerarse ser lo suficientemente rígidas como para que la viga presente mecanismos de fallo por cortante. Veremos posteriormente que esta relación no se cumple estrictamente para valores de t_f/t_w próximos a 3.

Nuestra viga de alma corrugada fue rigidizada con dos rigidizadores laterales y uno central. Tanto para la anchura como para el espesor de los rigidizadores se tomaron los mismos valores que para las alas, 500 mm y 50 mm respectivamente. La distancia entre los extremos de la viga y los rigidizadores laterales resultó ser de $a_1 + a_4/2 = 462,5 \text{ mm}$ y la distancia entre cada uno de estos y el rigidizador central, $a = 8 \times a_1 + 8 \times a_4 = 4800 \text{ mm}$, distancia correspondiente a 4 ondas corrugadas. La longitud total de nuestra viga de alma corrugada alcanzó, por tanto, un valor de $L_{total} = 462,5 + 4800 + 4800 + 462,5 = 10525 \text{ mm}$.

Todos los valores hasta ahora mencionados se mantuvieron constantes a lo largo de nuestro estudio. No sucede lo mismo con la altura y el espesor del alma, los cuales fuimos variando para constituir los diferentes modelos estudiados. Para la altura del alma se adoptaron los valores extremos empleados por Hassanein and Kharoob en [9], 1600 y 2400 mm. Por otro lado, el espesor del alma tomó los valores de 6, 9 y 12 mm. Dichos valores fueron combinados con las dos alturas del alma previamente mencionadas, constituyendo un total de seis casos diferentes a estudiar.

En Tabla 3.1 podemos ver un resumen de los parámetros empleados, así como una pequeña descripción de los mismos y el valor adoptado por cada uno de ellos.

Descripción	Parámetro	Valor
Longitud del panel paralelo	a_1	325 mm
Longitud del panel inclinado	a_2	325 mm
Longitud proyección vertical panel inclinado	a_3	175 mm
Longitud proyección horizontal panel inclinado	a_4	275 mm
Altura del alma	h_w	1600, 2400mm
Espesor del alma	t_w	6, 9, 12 mm
Anchura de las alas	b_f	500 mm
Espesor de las alas	t_f	50 mm
Anchura de los rigidizadores	b_s	500 mm
Espesor de los rigidizadores	t_s	50 mm

Tabla 3.1. Parámetros empleados en vigas de alma corrugada

Con el fin de observar con mayor claridad los aspectos previamente mencionados se recoge en la Figura 3.2 una vista en perspectiva de la viga.

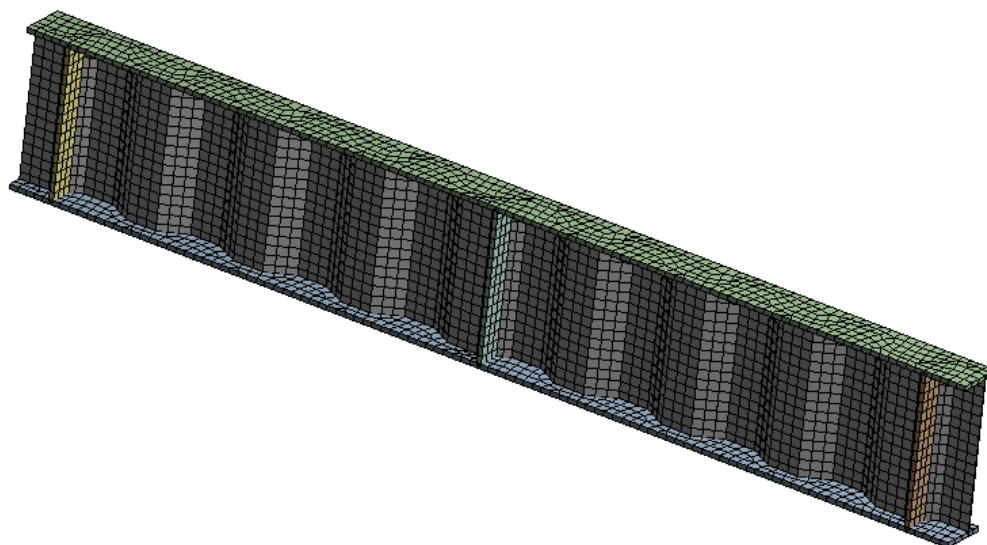


Figura 3.2. Vista general viga alma corrugada con malla empleada en el estudio

3.1.2 Imperfecciones iniciales

Con el fin de crear deformaciones fuera el plano de aplicación de la carga, se añadió a los diferentes modelos estudiados una imperfección inicial. Dicha imperfección se basa en la forma que adquiere nuestra viga en el primer modo de pandeo multiplicada por una escala, tal y como se establece en el Eurocódigo EN1993-1-5. El valor de la escala que se adoptó fue el correspondiente al espesor del alma, t_w , siguiendo los pasos realizados por Hassanein and Kharoob en [9]. En definitiva, los multiplicadores adoptados fueron: 6, 9 y 12.

En las Figuras 3.3 a 3.8, podemos observar la deformación de nuestra viga correspondiente al primer modo de pandeo para los diferentes casos estudiados, $[h_w - t_w]$.

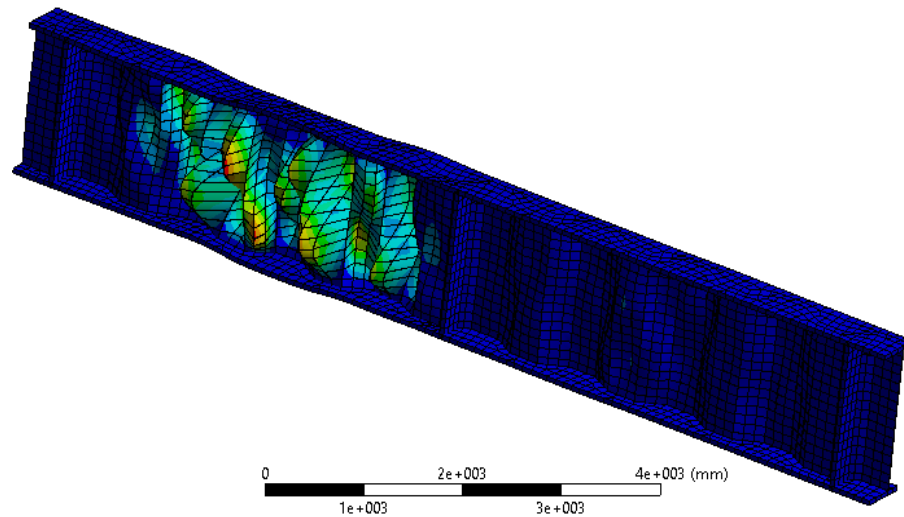


Figura 3.3. Primer modo de pandeo. Viga 1600-6

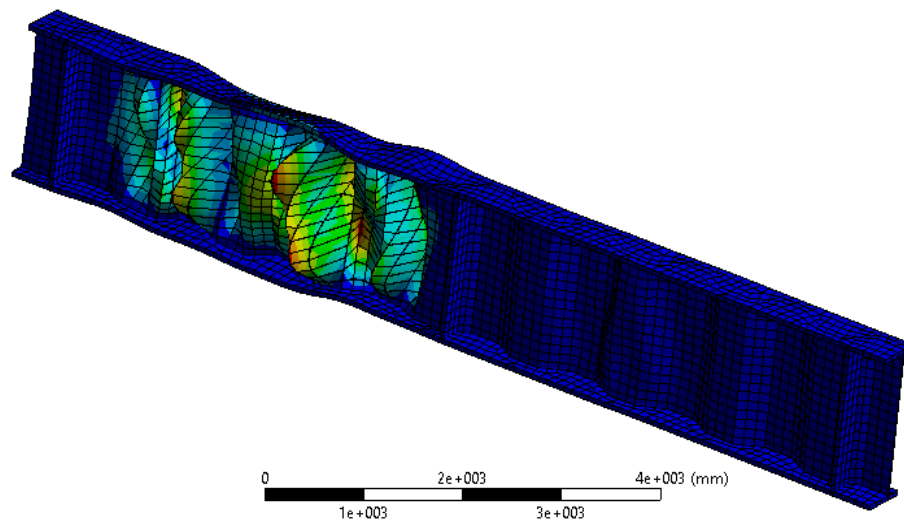


Figura 3.4. Primer modo de pandeo. Viga 1600-9

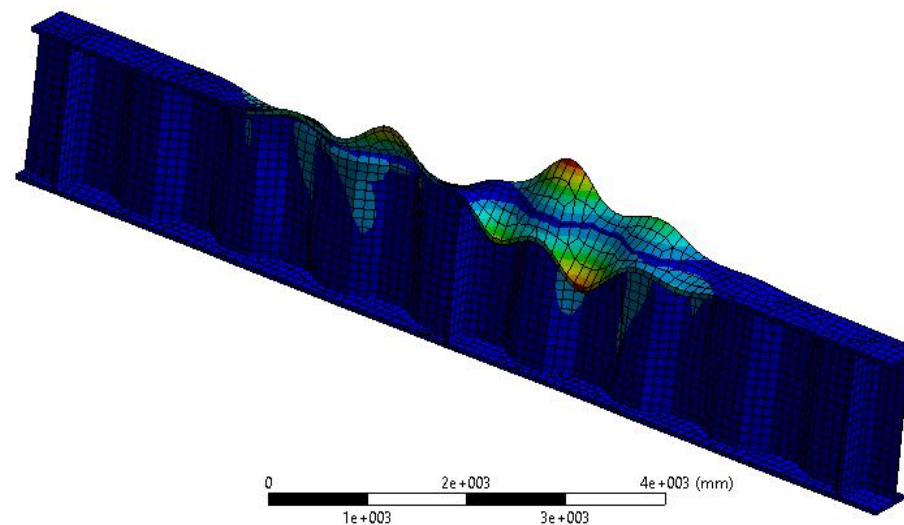


Figura 3.5. Primer modo de pandeo. Viga 1600-12

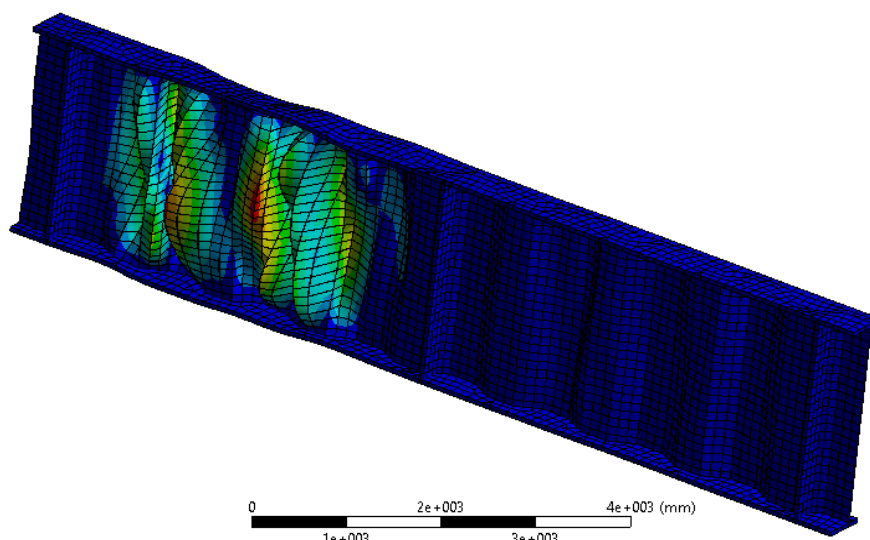


Figura 3.6. Primer modo de pandeo. Viga 2400-6

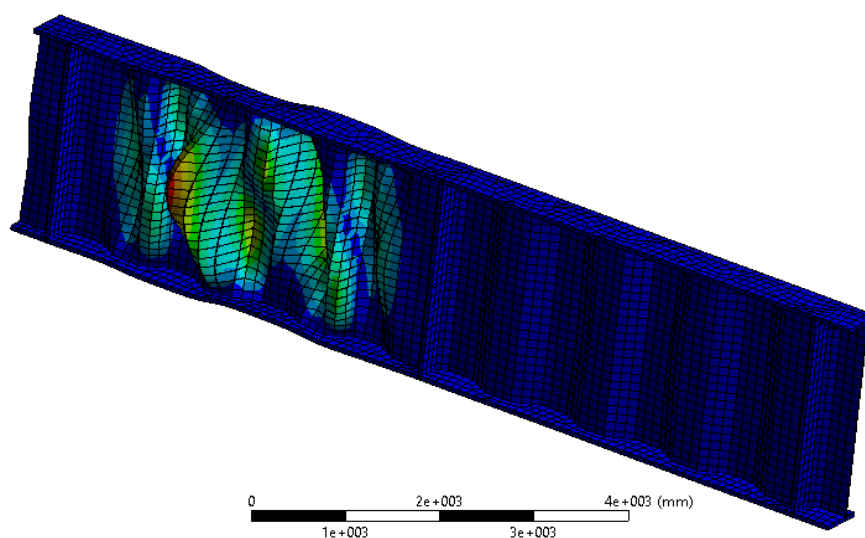


Figura 3.7. Primer modo de pandeo. Viga 2400-9

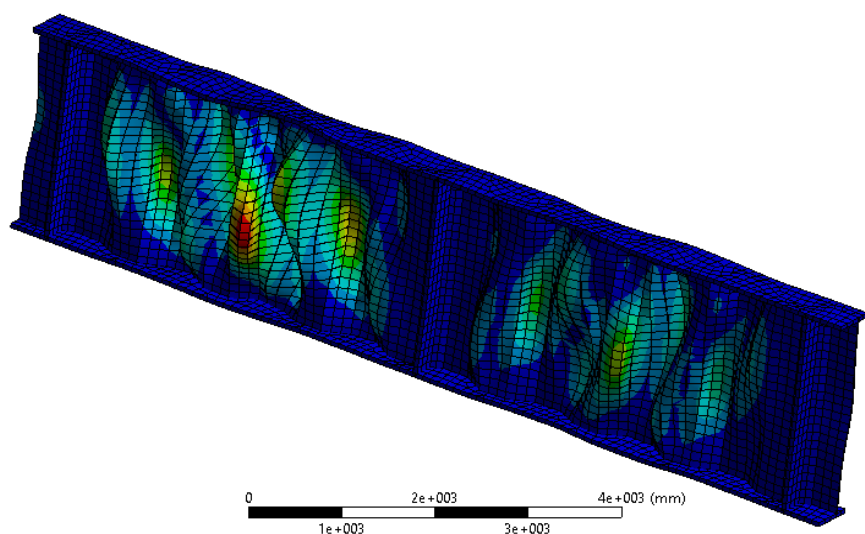


Figura 3.8. Primer modo de pandeo. Viga 2400-12

3.2 Descripción del modelo de Elementos Finitos

3.2.1 Software y tamaño de la malla

Para el estudio de los diferentes modelos empleamos el programa *ANSYS Structural Analysis* el cual está dotado de herramientas de análisis de Elementos Finitos (EF). Dichas herramientas nos permiten simular el comportamiento que tendrá nuestra estructura bajo la acción de una carga, o bien, tras imponer en esta un desplazamiento, como después explicaremos.

En cuanto al tamaño de los elementos que componen la malla, estos deben tener las dimensiones adecuadas, buscando un equilibrio entre unos elementos muy pequeños que ralentizarían el procesamiento del modelo por parte del programa y unos elementos muy grandes que darían lugar a la obtención de resultados poco precisos.

En el caso de nuestra viga de alma corrugada, la longitud de los subpaneles que componen el alma es de 325 mm, por tanto, teniendo en cuenta el estudio realizado por Hassanein and Kharoob en [8], los resultados obtenidos empiezan a converger a partir del empleo de 3 elementos por longitud horizontal.

Por todo lo dicho anteriormente, se adoptó para los elementos de nuestra viga una forma cuadrática y un tamaño máximo de 100 mm. Volviendo a la Figura 3.2, podemos ver la malla resultante.

3.2.2 Características del material empleado

El material empleado para el diseño de los diferentes modelos estudiados fue un acero S-355. Se estableció para el material un comportamiento bilineal, definido por dos líneas rectas con diferente pendiente, una para la parte elástica y otra para la parte plástica.

Para la configuración de dicho material en el programa *ANSYS Structural Analysis* se introdujeron los valores de la Tabla 3.2:

Descripción	Parámetro	Valor
Tensión límite elástico	σ_y	355 MPa
Tensión última	σ_u	510 MPa
Módulo de Young	E	$2,1 \times 10^{11}$ Pa
Módulo de Poisson	ν	0,3
Módulo zona plástica	E_T	2000 MPa
Densidad	ρ	7850 kg/m ³

Tabla 3.2. Características del material empleado

En la Figura 3.9 observamos la curva tensión-deformación correspondiente a nuestro material.

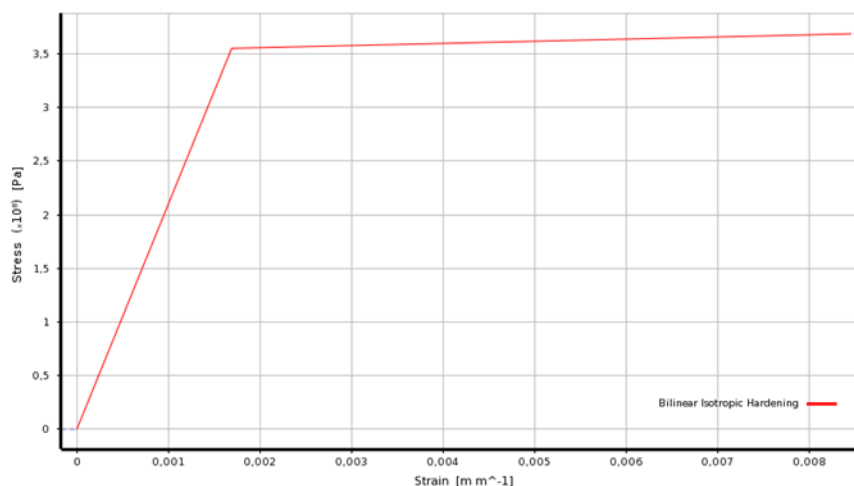


Figura 3.9. Curva tensión deformación acero S-355 empleado

3.2.3 Condiciones de contorno y aplicación de la carga/desplazamiento

A pesar de basarnos en el modelo estudiado por Hassanein and Kharoob en [9], el hecho de utilizar otro programa para el análisis nos lleva a definir unas condiciones de contorno diferentes.

Nuestra viga se comporta como una viga biapoyada en los extremos cuyo punto central solo puede desplazarse verticalmente. Asimismo se restringió la rotación de los extremos alrededor del eje X y el desplazamiento en la dirección Z de los tres ejes resultantes de la intersección del alma con los tres rigidizadores. Podemos observar las limitaciones impuestas en la Tabla 3.3 y en la Figura 3.10 mostradas a continuación.

	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
Eje a	Libre	Libre	0	Fijo	Libre	Libre
Eje b	Libre	Libre	0	-	-	-
Eje c	Libre	Libre	0	Fijo	Libre	Libre
Eje d	-	-	-	Fijo	Libre	Libre
Eje e	-	-	-	Fijo	Libre	Libre
Eje f	-	-	-	Fijo	Libre	Libre
Eje g	-	-	-	Fijo	Libre	Libre
Punto A	Libre	0	Libre	-	-	-
Punto B	0	Libre	Libre	-	-	-
Punto C	Libre	0	Libre	-	-	-

Tabla 3.3. Condiciones de contorno viga de alma corrugada

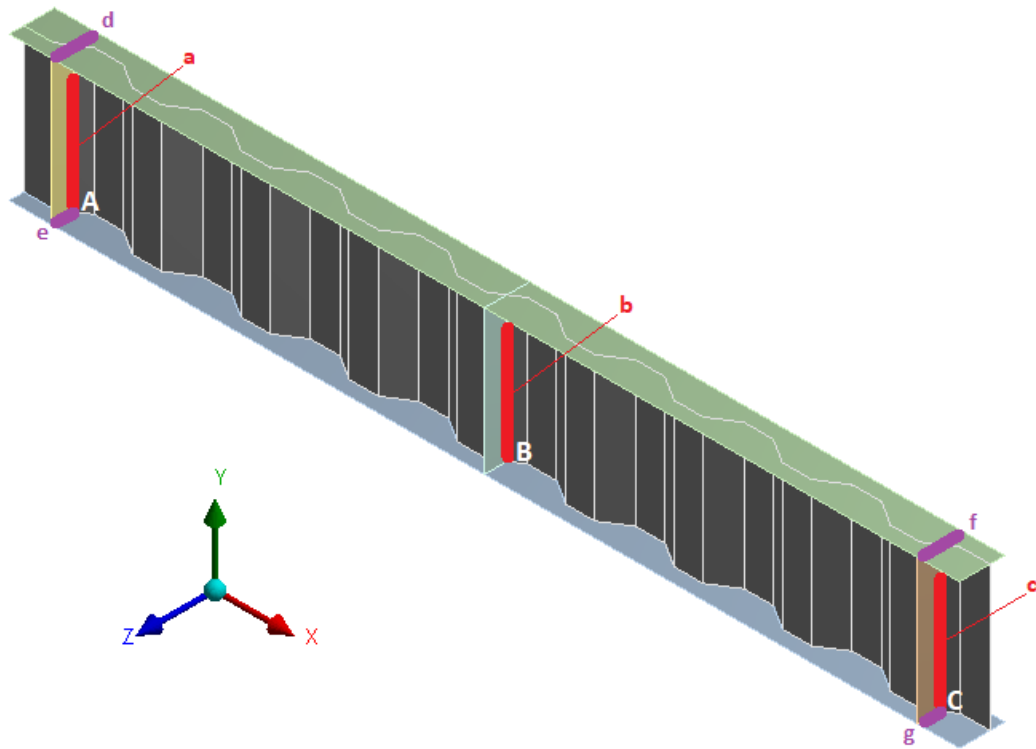


Figura 3.10. Vista de los elementos con limitaciones de movimiento en viga alma corrugada

En cuanto al análisis del comportamiento de las diferentes vigas modelo hasta su resistencia última, es importante destacar que dicho proceso no fue llevado a cabo de la forma más común, consistente en la aplicación de una carga en su punto central.

Aprovechando las ventajas que proporciona *ANSYS Structural Analysis* en el análisis con elementos finitos, se aplicó un desplazamiento impuesto al eje central *b*, el cual podemos observar en la Figura 3.10, obteniendo al mismo tiempo la fuerza que sería necesaria para lograr dicho desplazamiento en los diferentes escalones de aplicación del mismo. Esta última fuerza comentada es fácilmente obtenible a partir del campo *Force Reaction* proporcionado por nuestro software.

3.3 Curvas Fuerza-Desplazamiento

En este apartado procederemos a mostrar las diferentes curvas Fuerza-Desplazamiento obtenidas para cada uno de los modelos de viga de alma corrugada estudiados. Los resultados se agrupan en dos gráficos. El primero de ellos, Figura 3.11, engloba las tres vigas con altura del alma de 1600 mm y espesores 6, 9 y 12, mientras que el segundo, Figura 3.12, recoge las vigas de altura 2400 mm para esos tres mismos espesores.

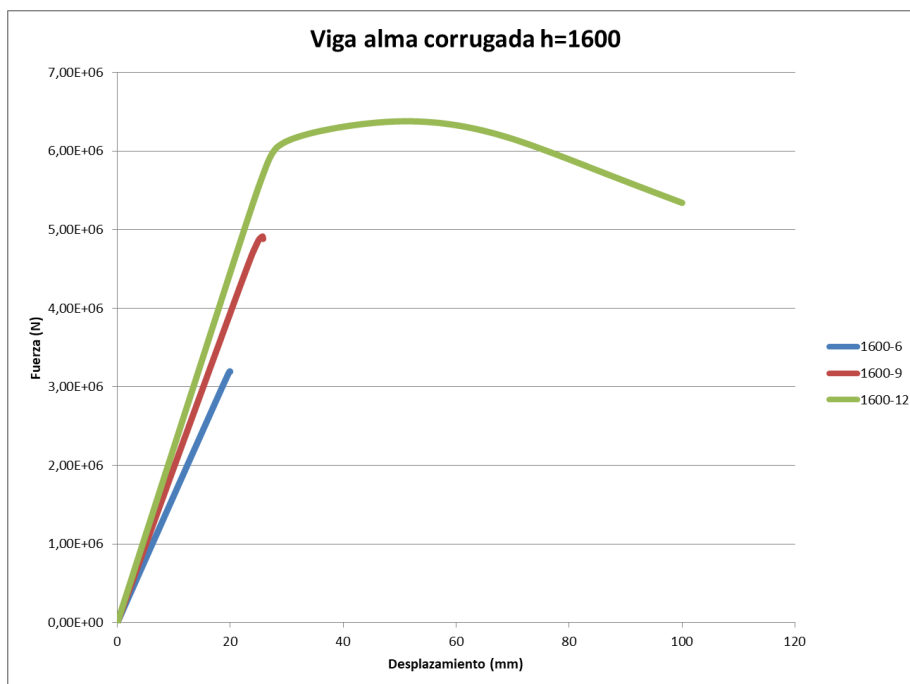


Figura 3.11. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma corrugada h=1600

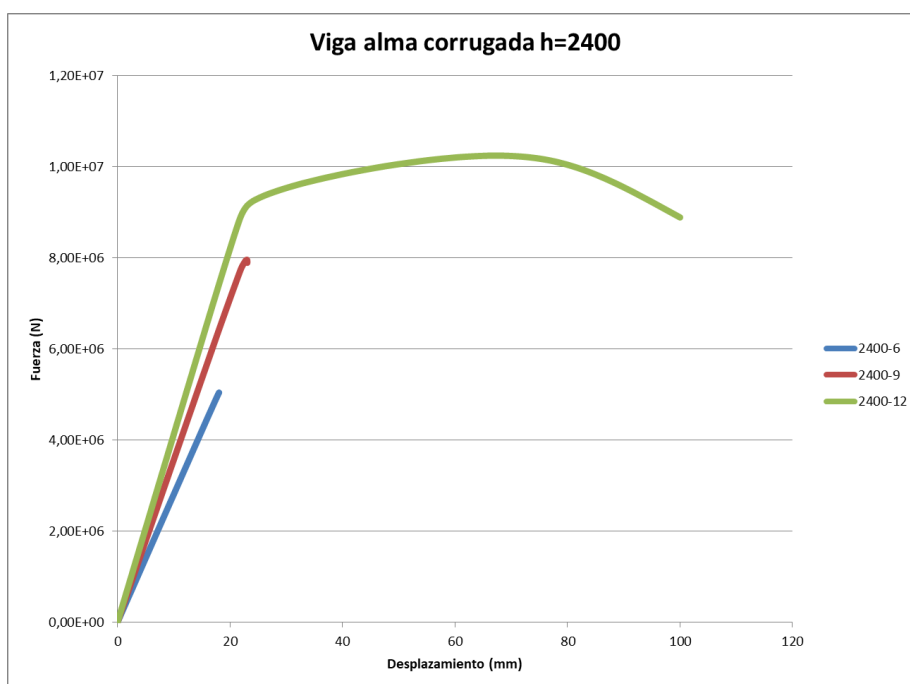


Figura 3.12. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma corrugada h=2400

A vista de los resultados obtenidos se observa claramente una evolución de las curvas Fuerza-Desplazamiento en función del espesor del alma con independencia de la altura del mismo. Es decir, vemos que el valor que toma el espesor del alma en nuestras vigas influye mucho más en el modo de comportamiento de las mismas hasta rotura que la variación de la altura.

Podemos establecer entonces dos grupos. Por un lado las vigas con espesores $t_w = 6 \text{ mm}$ y $t_w = 9 \text{ mm}$, y por otro las vigas con espesor $t_w = 12 \text{ mm}$.

Para el primer grupo se observa, en las cuatro situaciones estudiadas, un comportamiento elástico-lineal hasta rotura la cual tiene lugar de forma repentina, sin deformación plástica previa. Es decir, estamos ante un comportamiento frágil.

Es importante destacar que el fallo de las mismas, en el momento en el que están sometidas a su carga máxima, se produce por la formación de un pliegue en el alma corrugada. Dicho pliegue tiene lugar de forma instantánea, de ahí el rápido colapso de las vigas al alcanzar cierto valor de carga.

En definitiva, se produce un fallo por cortante del alma tanto para las vigas de espesor 6 como para las de espesor 9.

Por otro lado tenemos un segundo grupo constituido por las vigas de espesor 12. En este caso las dos vigas estudiadas presentan una curva Fuerza-Desplazamiento con forma similar. Se observa un primer tramo con comportamiento elástico-lineal, pero, a diferencia de las de espesor 6 y 9, llegado un punto comienzan a deformarse plásticamente, alcanzándose la carga máxima para altos valores del desplazamiento.

Este comportamiento es debido a la influencia de las alas, y es que el fallo no tiene lugar en el alma por cortante, como en el caso anterior, sino que lo que se está produciendo es un fallo de las alas por flexión con independencia del alma. Las alas se deforman plásticamente antes de producirse el colapso, a diferencia del grupo previo, donde el fallo por cortante del alma era repentino. Podríamos decir de algún modo que la viga avisa antes de alcanzar el estado límite último.

Como expusimos al inicio de este capítulo, en la descripción de la geometría, a la hora de la elección de los espesores de las alas, 50 mm, y del alma, 6, 9 y 12 mm, se trató de asegurar en todo momento una relación entre los mismos tal que $t_f/t_w \geq 3$. De este modo, según recogía Hassanein and Kharoob en [8], las alas pueden considerarse ser lo suficientemente rígidas y la viga presentará mecanismos de fallo por cortante.

Pues bien, vemos que para los casos estudiados que tienen un espesor $t_w = 12 \text{ mm}$, para los cuales la relación t_f/t_w adopta el valor de 4.17, no se cumple esta relación pues, como hemos dicho, se produce el fallo de las alas por flexión.

A continuación, en las Figuras 3.13 a 3.18, se recoge la distribución tensional de los diferentes modelos estudiados en el estado límite último, es decir, sometidos a carga máxima.

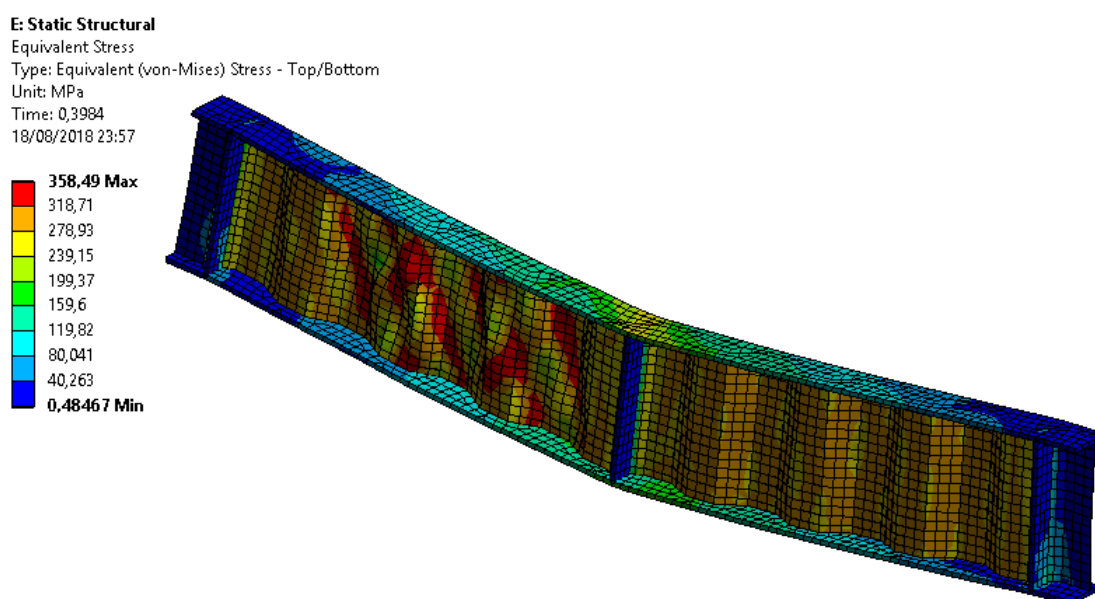


Figura 3.13. Distribución de tensiones viga alma corrugada 1600-6 bajo carga máxima

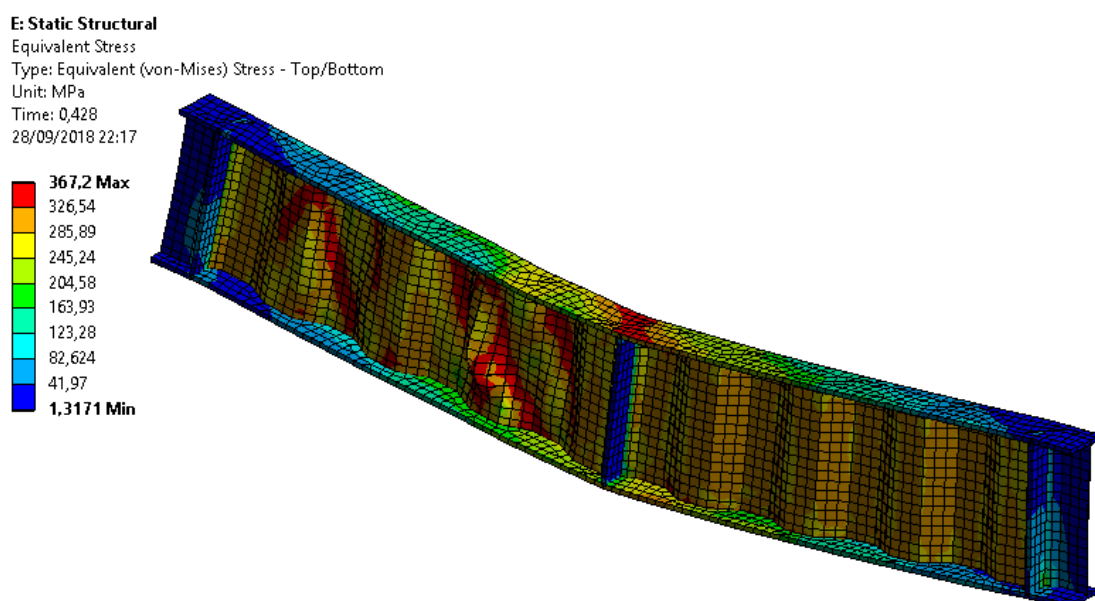


Figura 3.14. Distribución de tensiones viga alma corrugada 1600-9 bajo carga máxima

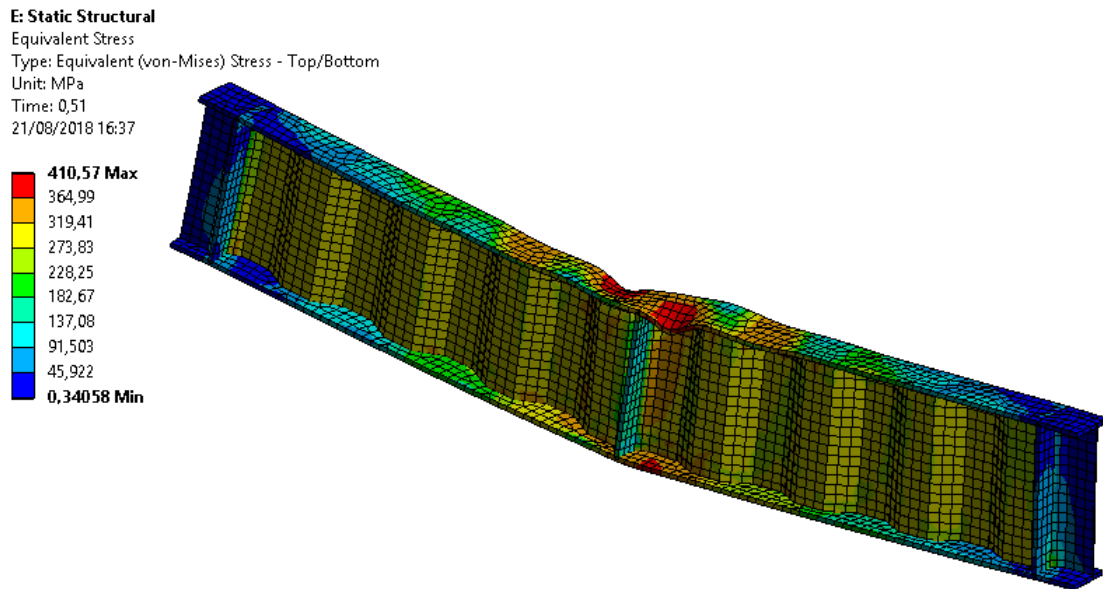


Figura 3.15. Distribución de tensiones viga alma corrugada 1600-12 bajo carga máxima

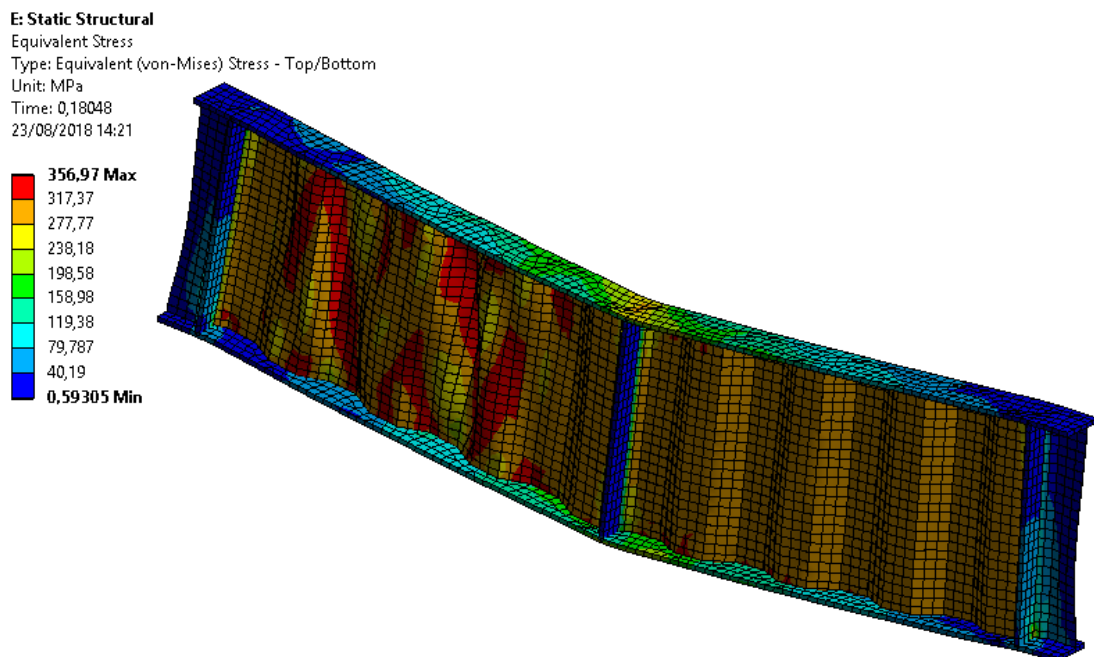


Figura 3.16. Distribución de tensiones viga alma corrugada 2400-6 bajo carga máxima

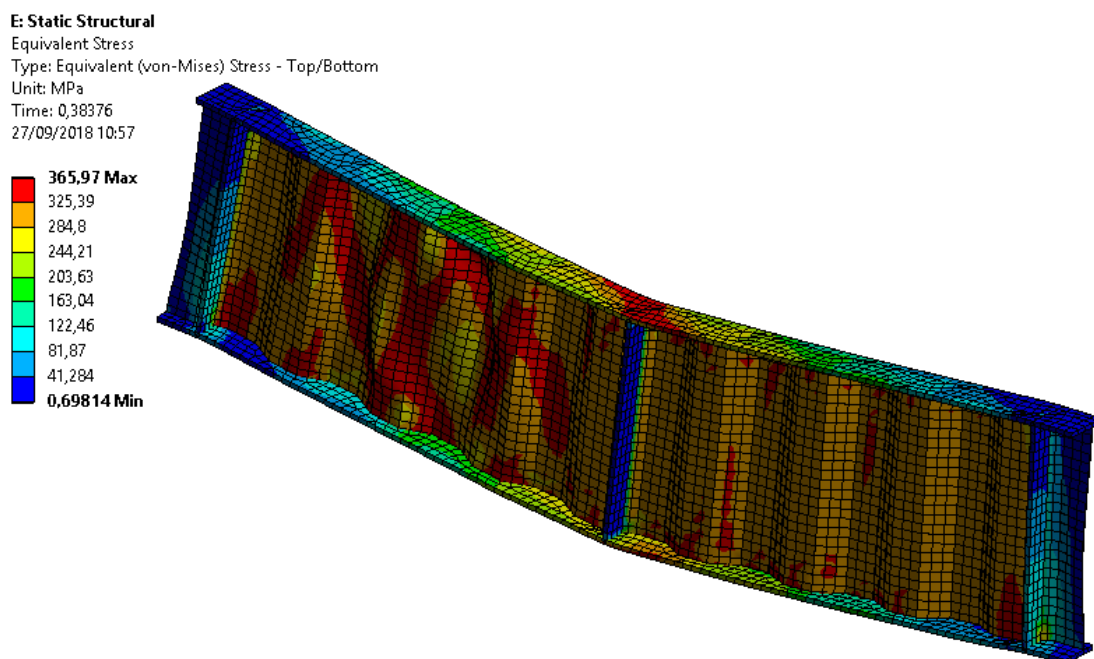


Figura 3.17. Distribución de tensiones viga alma corrugada 2400-9 bajo carga máxima

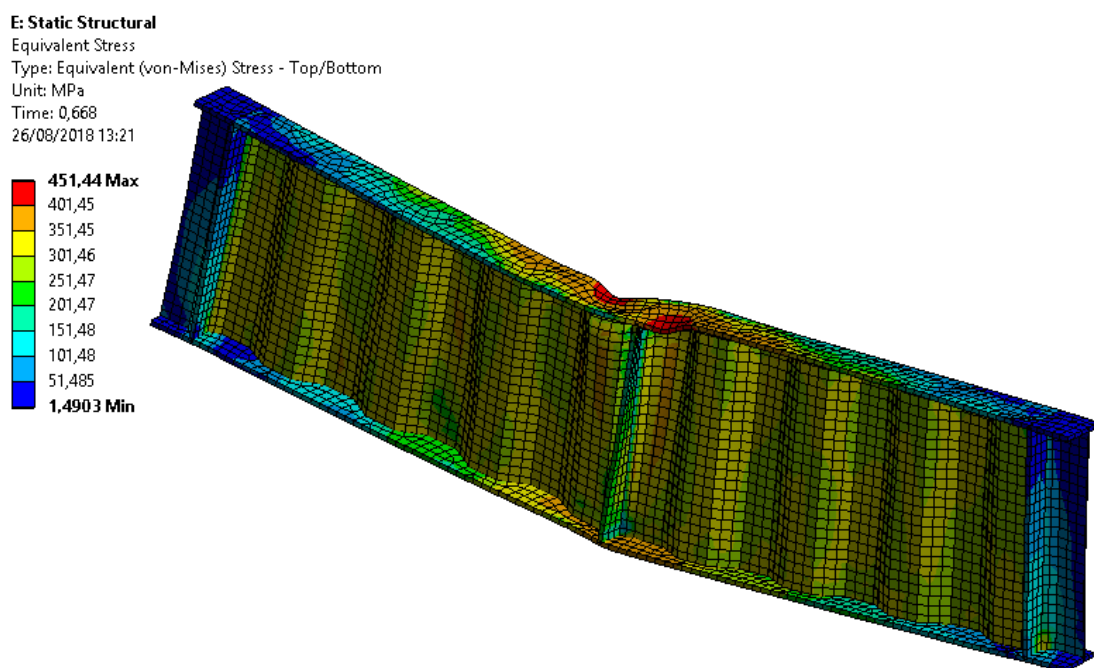


Figura 3.18. Distribución de tensiones viga alma corrugada 2400-12 bajo carga máxima

Las zonas sombreadas en color rojo son las correspondientes a las áreas sometidas a una mayor tensión. Vemos que para las dos vigas con espesor 6 mm esta zona se encuentra completamente en el alma corrugada. Para las vigas en espesor 9 mm aparece por un lado la zona del alma corrugada

y por otro la parte central de las alas, no obstante, cabe destacar que en este caso el colapso sigue produciéndose por cortante en el alma como hemos expuesto con anterioridad.

Finalmente tenemos las dos vigas con espesor de 12 mm. En ambos casos se puede ver que la máxima tensión, con notable diferencia respecto al resto de partes de la viga, se produce en las alas, concretamente en su parte central, lo cual nos reafirma en la idea de que el fallo se produce por flexión en dichas alas.

3.4 Estudio de la rigidez

En este apartado se recogen con exactitud los valores de las rigideces obtenidos en el análisis.

En las Tablas 3.4 y 3.5 se muestran por un lado las rigideces iniciales correspondientes al primer escalón de aplicación del desplazamiento, y por otro, en el campo “Rigidez $L/1000$ ”, la rigidez correspondiente a un desplazamiento de 10 mm para cada una de las vigas.

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Rigidez inicial (KN/mm)	Rigidez $L/1000$ (KN/mm)
1600-6	162	162
1600-9	198	197
1600-12	223	223

Tabla 3.4. Rigideces vigas de alma corrugada con $h=1600$

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Rigidez inicial (KN/mm)	Rigidez $L/1000$ (KN/mm)
2400-6	281	281
2400-9	357	357
2400-12	413	413

Tabla 3.5. Rigideces vigas de alma corrugada con $h=2400$

Si observamos los resultados obtenidos vemos que apenas se presenta diferencia entre el valor de la rigidez inicial y el valor de la rigidez para un desplazamiento de 10 mm en los casos estudiados.

Por tanto, podemos concluir que las vigas de alma corrugada presentan un comportamiento lineal en la zona elástica, es decir, la rigidez se mantiene constante, no produciéndose un descenso de esta con la carga; y es que, las vigas de alma corrugada, constituyen en general sistemas muy rígidos, y como tal, son capaces de resistir grandes valores de carga con desplazamientos muy pequeños, perdiéndose, al mismo tiempo, ductilidad.

Estableceremos ahora un orden en las rigideces obtenidas:

$$R_{1600-6} < R_{1600-9} < R_{1600-12} < R_{2400-6} < R_{2400-9} < R_{2400-12}$$

Como cabía esperar, la rigidez aumenta a medida que lo hace el espesor del alma y, del mismo modo, a medida que aumenta su altura. Se recoge en la Figura 3.19 todas las curvas Fuerza-Desplazamiento resultantes juntas para facilitar la interpretación de todo lo comentado hasta ahora.

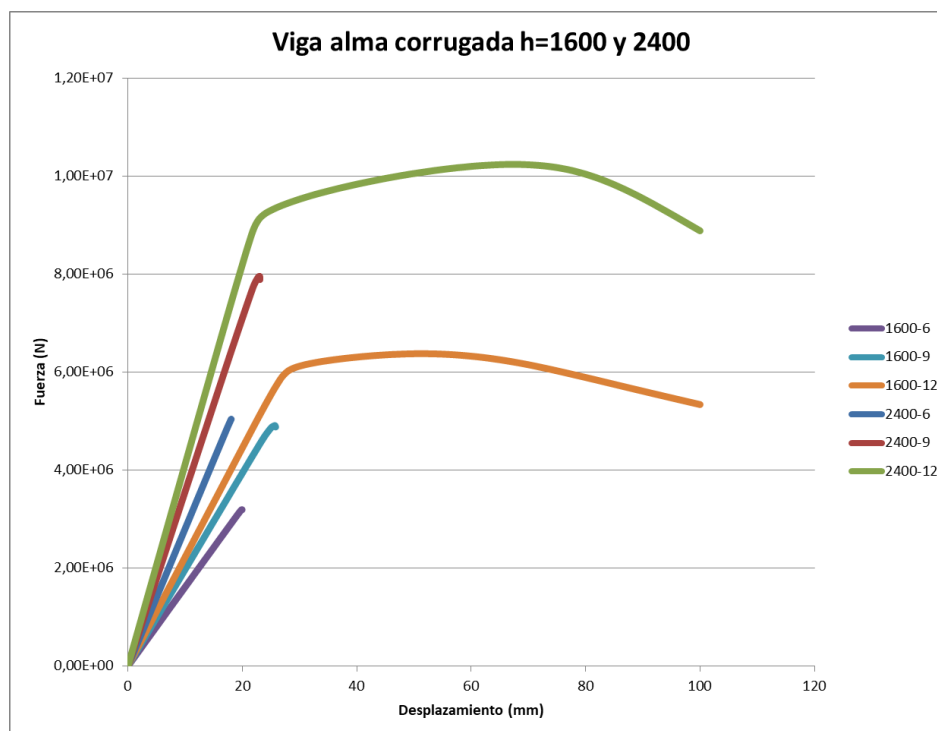


Figura 3.19. Curvas Fuera-Desplazamiento de todas las vigas de alma corrugada

3.5 Estudio de la resistencia última

En este último apartado procedemos a recoger los valores de carga máxima soportados por cada una de las vigas estudiadas. En las Tablas 3.6 y 3.7 podemos ver dichos valores.

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Carga máxima (KN)
1600-6	3197,5
1600-9	4913,2
1600-12	6379,7

Tabla 3.6. Carga máxima vigas de alma corrugada con h=1600

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Carga máxima (KN)
2400-6	5043,1
2400-9	7959,2
2400-12	10245,0

Tabla 3.7. Carga máxima vigas de alma corrugada con $h=2400$

Al igual que sucede con la rigidez, la carga máxima sustentada aumenta al incrementar el espesor del alma corrugada y al aumentar su altura.

Sin embargo, como hemos expuesto en los apartados previos, lo más significativo no es el valor de la carga en sí, sino las diferencias existentes en los desplazamientos cuando esta es alcanzada. Vemos que para los casos con espesor 12 mm los desplazamientos obtenidos están en el rango 50-70 mm mientras que para los espesores 6 y 9 mm el valor del desplazamiento en los cuatro casos está en torno a 20 mm. Cabe recordar que esta diferencia se debía principalmente al diferente modo de fallo, produciéndose un fallo repentino por cortante del alma en los casos de espesor 6 y 9 mm y un fallo por flexión de las alas bajo previa plastificación en los casos de espesor 12 mm.

Capítulo 4. Análisis por Elementos Finitos de vigas de alma plana.

4.1 Descripción de la geometría

En este apartado procederemos a describir la geometría de las vigas de alma plana que se emplearon en el estudio.

4.1.1 Dimensiones y morfología

Dado que el fin del presente estudio es, entre otros, la comparativa de las vigas de alma corrugada con aquellas que tienen el alma plana, resulta conveniente, modelar las vigas de alma plana con las mismas dimensiones que las vigas de alma corrugada descritas en el capítulo anterior.

Se adoptó, por tanto, una longitud total de 10525 mm, idéntica a la empleada en las vigas corrugadas. Para las dimensiones de las alas se tomó, igualmente, un espesor de 50 mm y una anchura de 500 mm.

En cuanto a los rigidizadores empleados, se debe mencionar que tres de ellos se mantuvieron constantes en todos los casos estudiados y los restantes, llamados rigidizadores intermedios, fueron variando en número y posición a lo largo del ensayo.

Los tres rigidizadores fijos, dos laterales y uno central, fueron situados en la misma posición que sus correspondientes en la viga de alma corrugada, es decir, los dos laterales a una distancia de los extremos de la viga de 462,5 mm y el central justo en el eje de simetría vertical de la viga, a una distancia de 4800 mm de cada uno de los rigidizadores laterales. Podemos comprobar que la suma de estas distancias obedece a la longitud total de la viga antes comentada:

$$L_{total} = 462,5 + 4800 + 4800 + 462,5 = 10525 \text{ mm}$$

Respecto a los rigidizadores intermedios, estos fueron situados, separados equitativamente, entre los rigidizadores fijos anteriores, es decir, a lo largo de los vanos de 4800 mm. En el presente análisis estudiamos los siguientes casos: a) ningún rigidizador intermedio, es decir, estudio de la viga de alma plana solo con los tres rigidizadores fijos; b) un rigidizador intermedio, es decir, un rigidizador en el centro de cada uno de los vanos de 4800 mm; c) dos rigidizadores intermedios y finalmente, d) tres rigidizadores intermedios a cada lado del eje central.

Es importante decir que de ahora en adelante cuando hablemos de la viga sin rigidizadores, en realidad, nos estaremos refiriendo a la viga sin rigidizadores intermedios. Del mismo modo, cuando hablemos de vigas de alma plana con 1, 2 y 3 rigidizadores, estaremos refiriéndonos a vigas con 1, 2 y 3 rigidizadores intermedios respectivamente puesto que los tres fijos se mantendrán para todos y cada uno de los modelos.

Para todos los rigidizadores empleados, tanto los fijos como los intermedios, se adoptó un espesor de 50 mm y una anchura de 500 mm.

Por último, al igual que en la viga de alma corrugada, el espesor y altura del alma fue variando a lo largo del estudio. Se consideraron las alturas de 1600 y 2400 mm, así como los espesores de 6, 9 y 12 mm.

Todos los casos estudiados fueron el resultado de la combinación de las diferentes alturas, espesores del alma y número de rigidizadores intermedios. De este modo, queda (N , número de casos estudiados):

$$N = 4 \text{ disposiciones de rigidizadores} \times 2 \text{ alturas} \times 3 \text{ espesores} = 24$$

En la Tabla 4.1 se recogen los principales parámetros empleados a lo largo del estudio:

Descripción	Parámetro	Valor
Altura del alma	h_w	1600, 2400 mm
Espesor del alma	t_w	6, 9, 12 mm
Anchura de las alas	b_f	500 mm
Espesor de las alas	t_f	50 mm
Número de rigidizadores intermedios a cada lado del rigidizador central fijo	N_{rig}	0, 1, 2, 3
Anchura de los rigidizadores	b_s	500 mm
Espesor de los rigidizadores	t_s	50 mm

Tabla 4.1. Parámetros empleados en vigas de alma plana

En la Figura 4.1 se muestra el aspecto de nuestras vigas de alma plana, en este caso, para 0 rigidizadores.

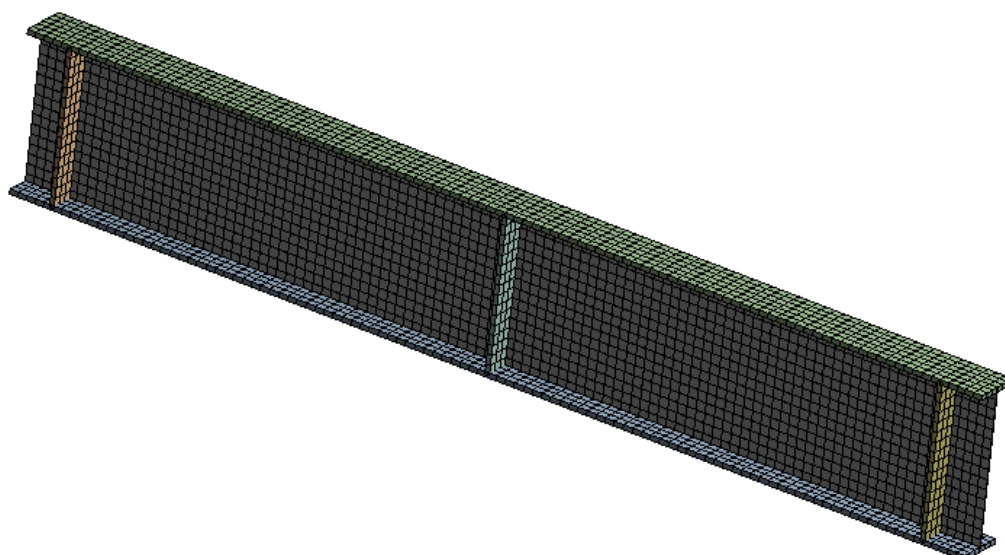


Figura 4.1. Vista general viga alma plana con malla empleada en el estudio

4.1.2 Imperfecciones iniciales

A todas las vigas de alma plana modeladas se les impuso una deformación inicial. Dicha deformación se corresponde, al igual que en las vigas de alma corrugada, con la forma que adoptan las vigas en el primer modo de pandeo multiplicada por su espesor. Recordemos que esta es la manera definida por el Eurocódigo EN1993-1-5 para la introducción de imperfecciones iniciales en el modelo de Elementos Finitos.

A continuación, Figuras 4.2 a 4.25, se recoge el aspecto de las vigas de alma plana estudiadas correspondiente al primer modo de pandeo para 0, 1, 2 y 3 rigidizadores intermedios, combinados con espesores del alma de 6, 9 y 12 mm y alturas del mismo de 1600 y 2400 mm.

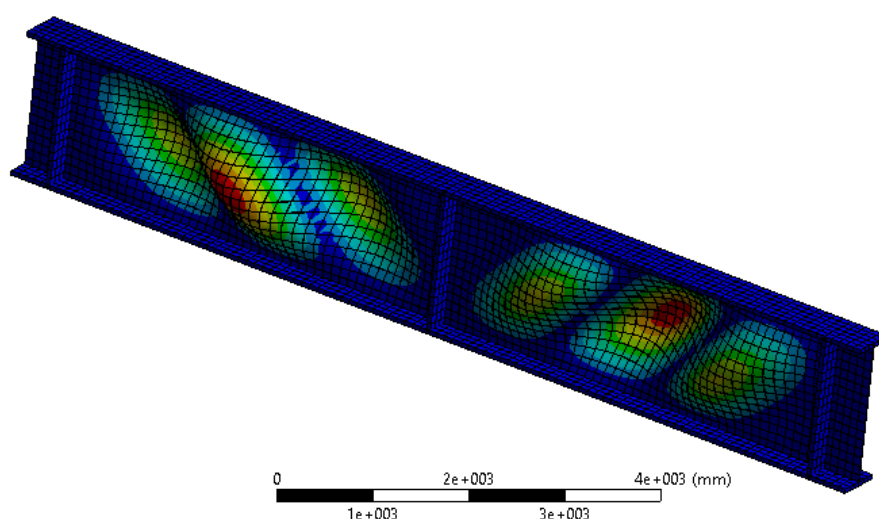


Figura 4.2. Primer modo de pandeo. Viga 1600-6. 0 rig

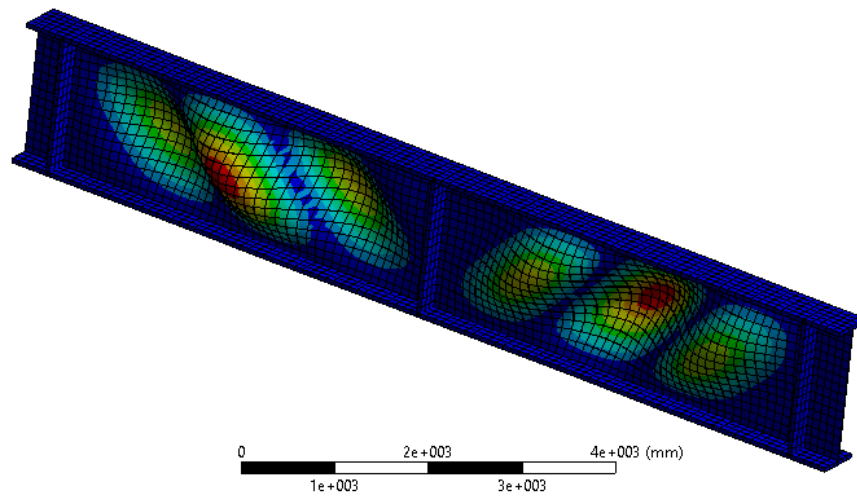


Figura 4.3. Primer modo de pandeo. Viga 1600-9. 0 rig

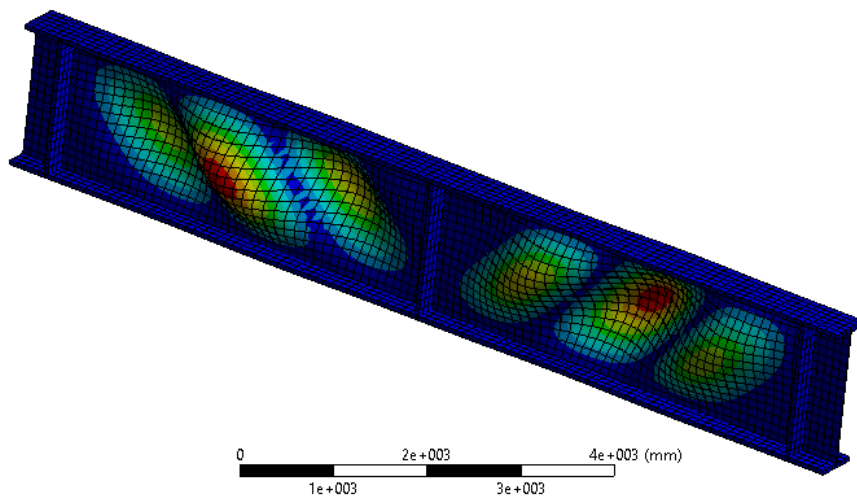


Figura 4.4. Primer modo de pandeo. Viga 1600-12. 0 rig

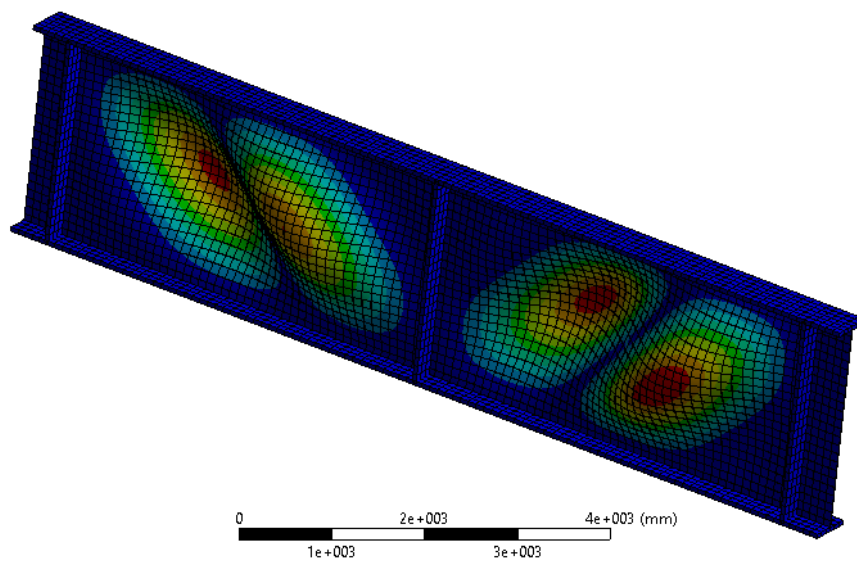


Figura 4.5. Primer modo de pandeo. Viga 2400-6. 0 rig

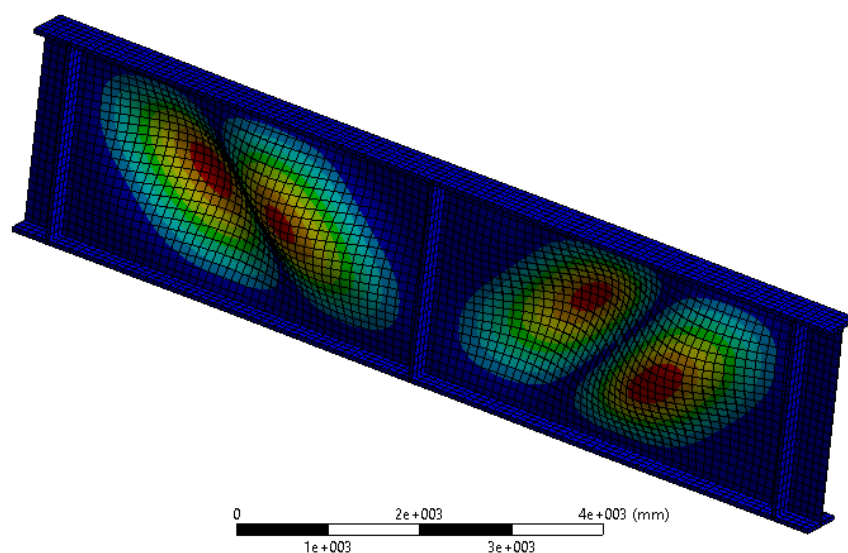


Figura 4.6. Primer modo de pandeo. Viga 2400-9. 0 rig

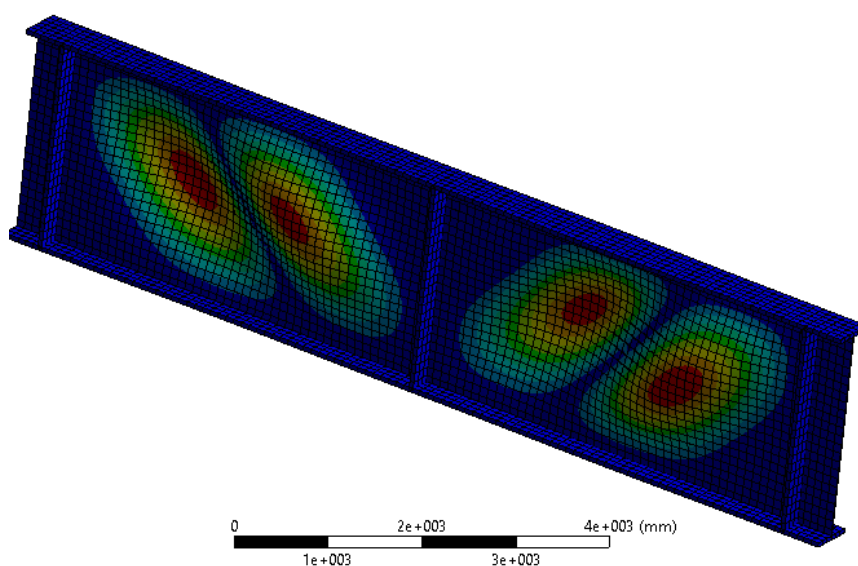


Figura 4.7. Primer modo de pandeo. Viga 2400-12. 0 rig

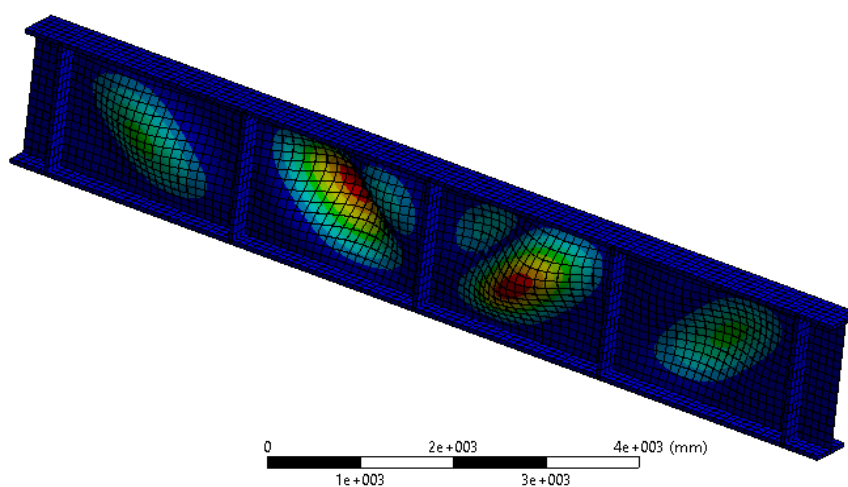


Figura 4.8. Primer modo de pandeo. Viga 1600-6. 1 rig

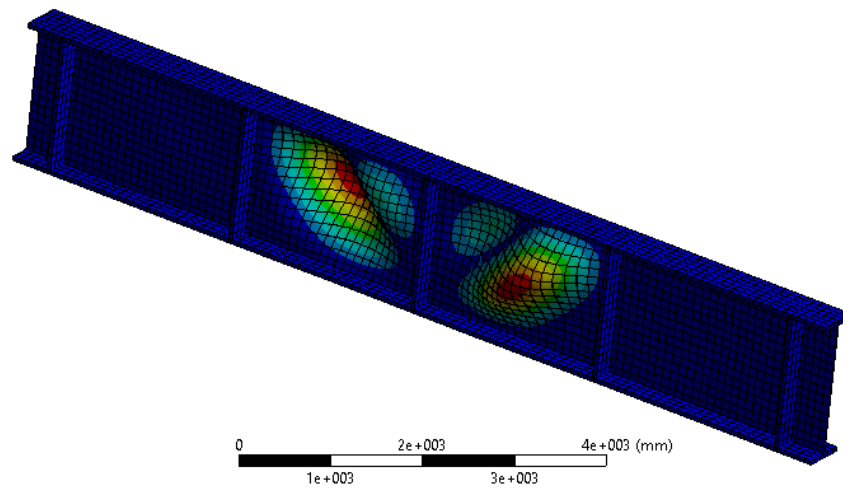


Figura 4.9. Primer modo de pandeo. Viga 1600-9. 1 rig

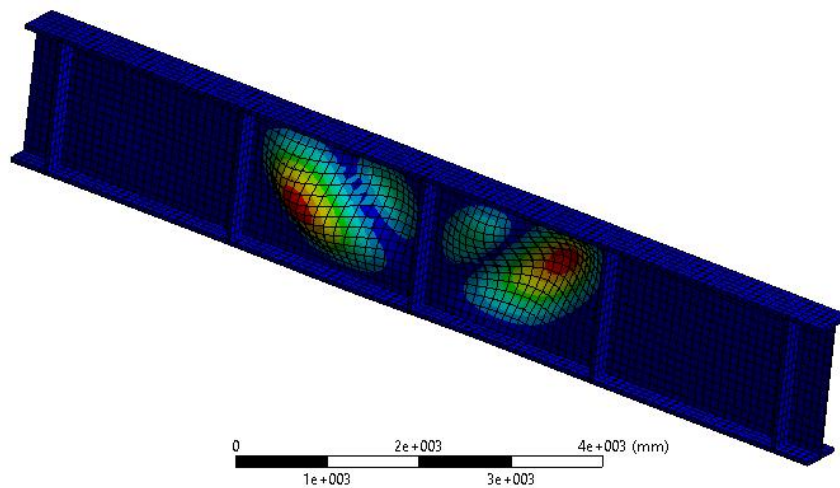


Figura 4.10. Primer modo de pandeo. Viga 1600-12. 1 rig

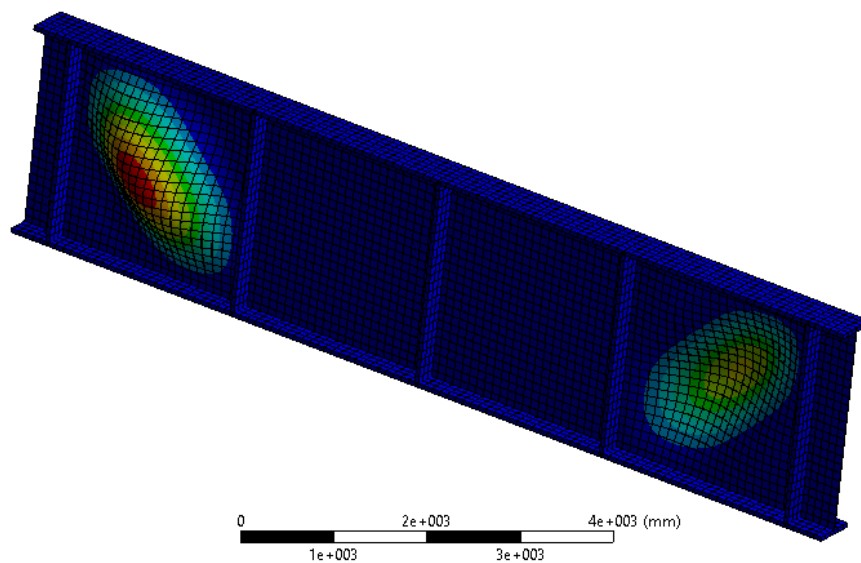


Figura 4.11. Primer modo de pandeo. Viga 2400-6. 1 rig

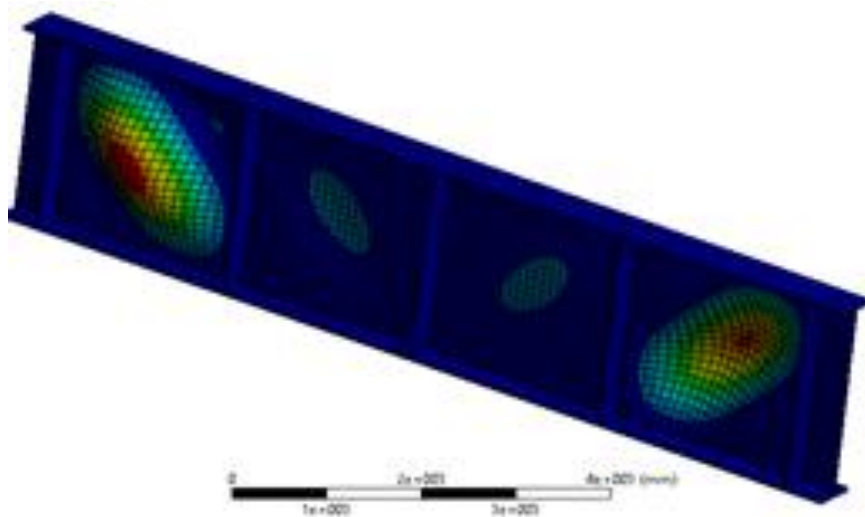


Figura 4.12. Primer modo de pandeo. Viga 2400-9. 1 rig

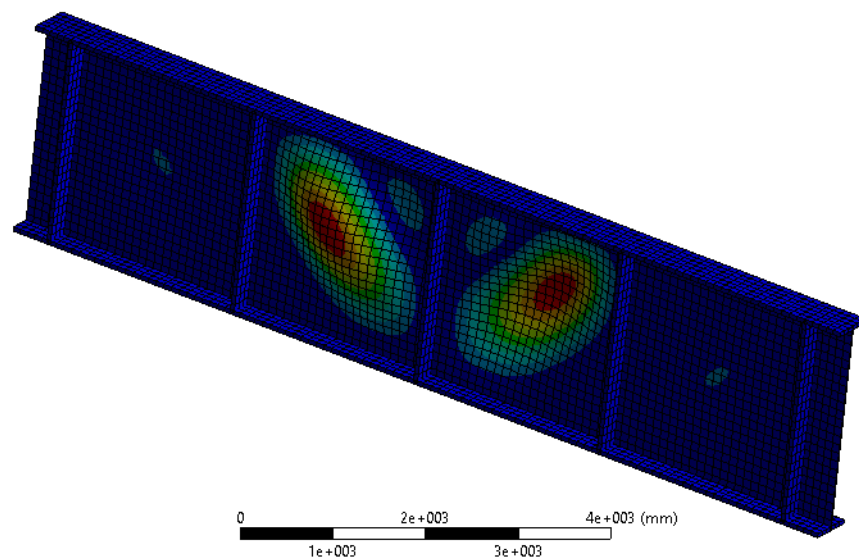


Figura 4.13. Primer modo de pandeo. Viga 2400-12. 1 rig

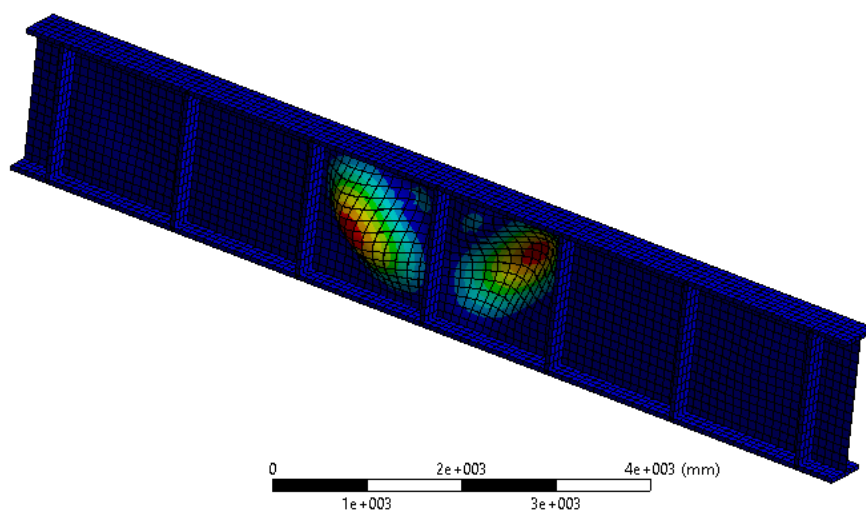


Figura 4.14. Primer modo de pandeo. Viga 1600-6. 2 rig

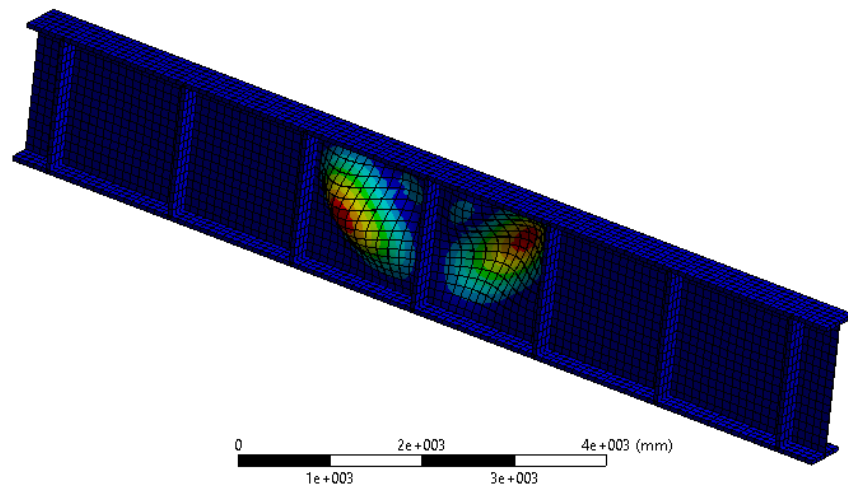


Figura 4.15. Primer modo de pandeo. Viga 1600-9. 2 rig

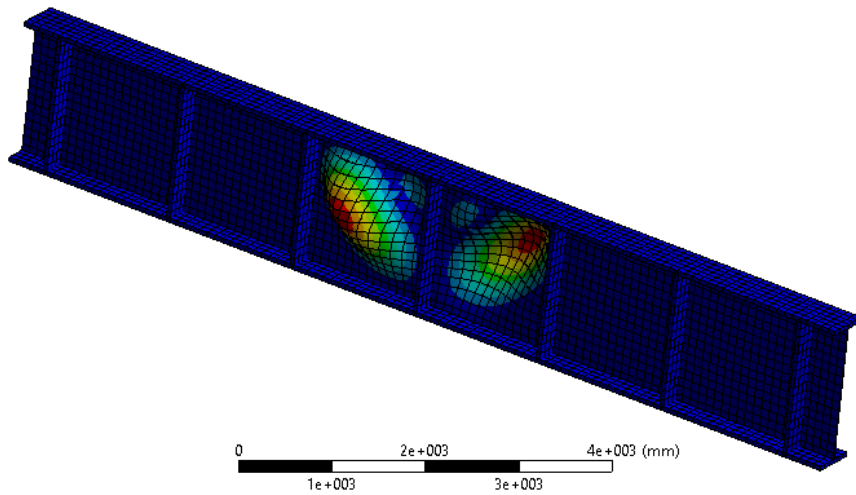


Figura 4.16. Primer modo de pandeo. Viga 1600-12. 2 rig

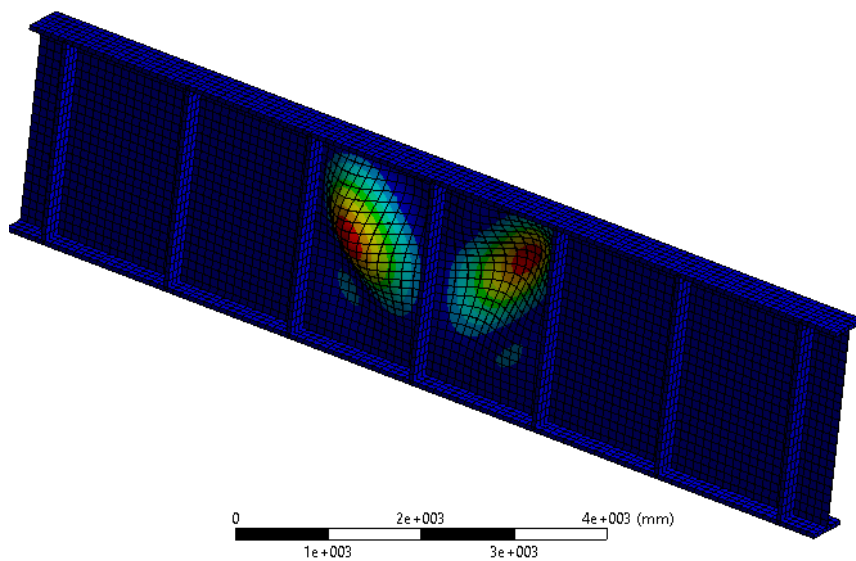


Figura 4.17. Primer modo de pandeo. Viga 2400-6. 2 rig

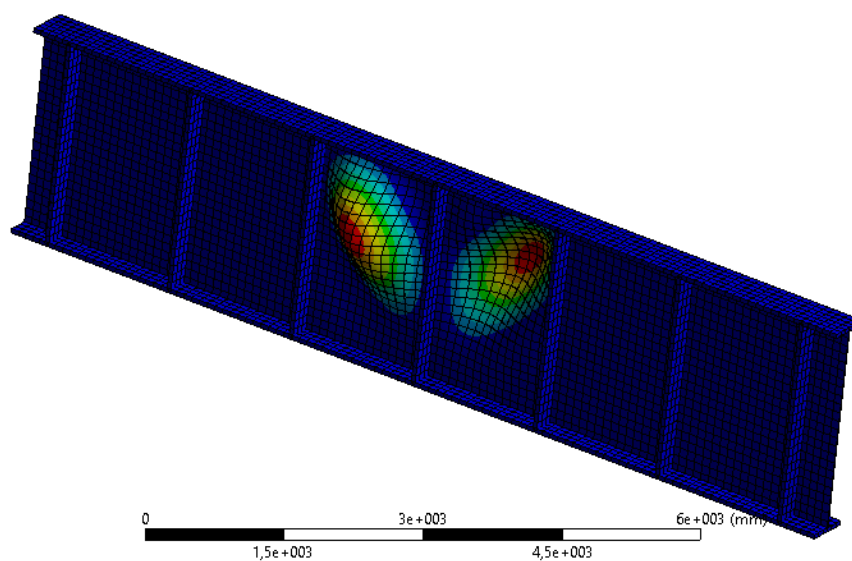


Figura 4.18. Primer modo de pandeo. Viga 2400-9. 2 rig

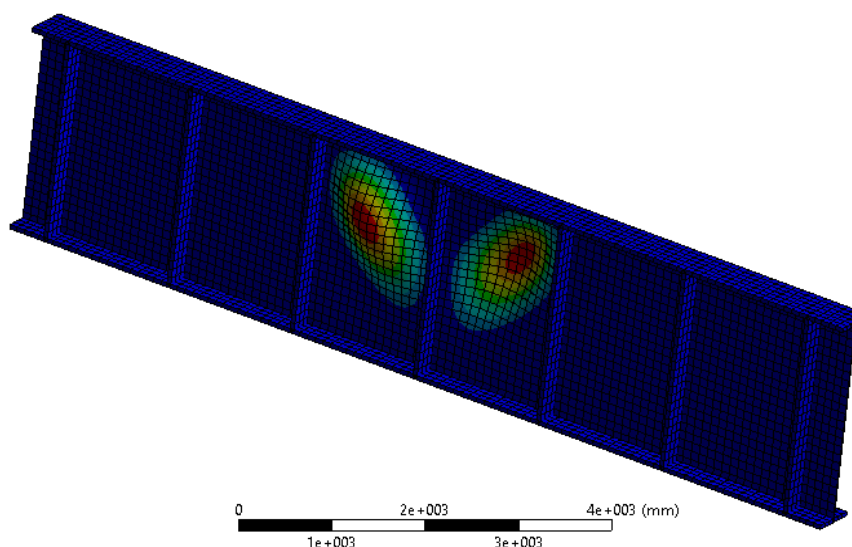


Figura 4.19. Primer modo de pandeo. Viga 2400-12. 2 rig

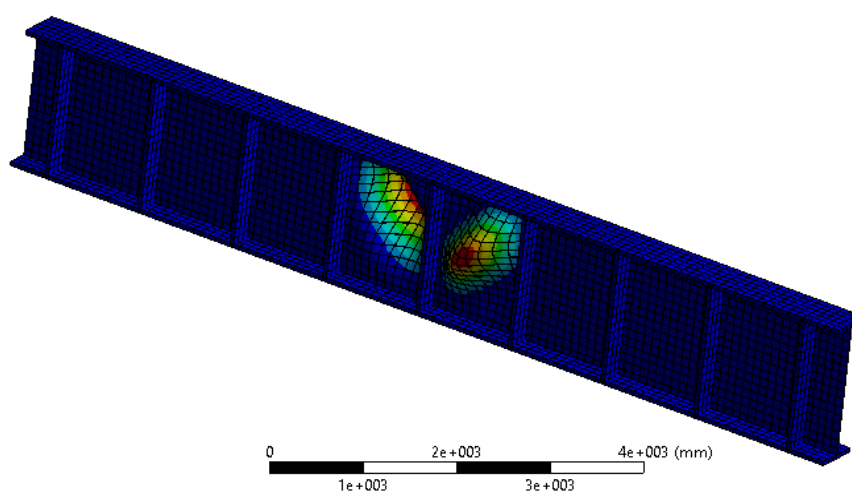


Figura 4.20. Primer modo de pandeo. Viga 1600-6. 3 rig

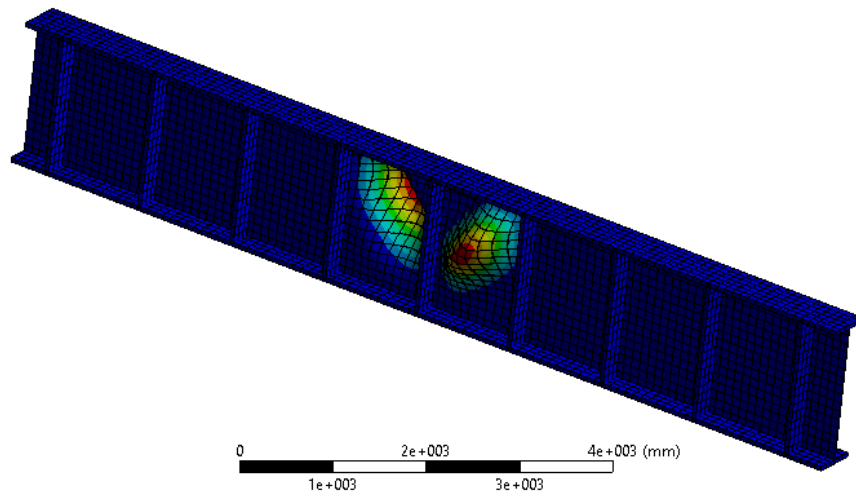


Figura 4.21. Primer modo de pandeo. Viga 1600-9. 3 rig

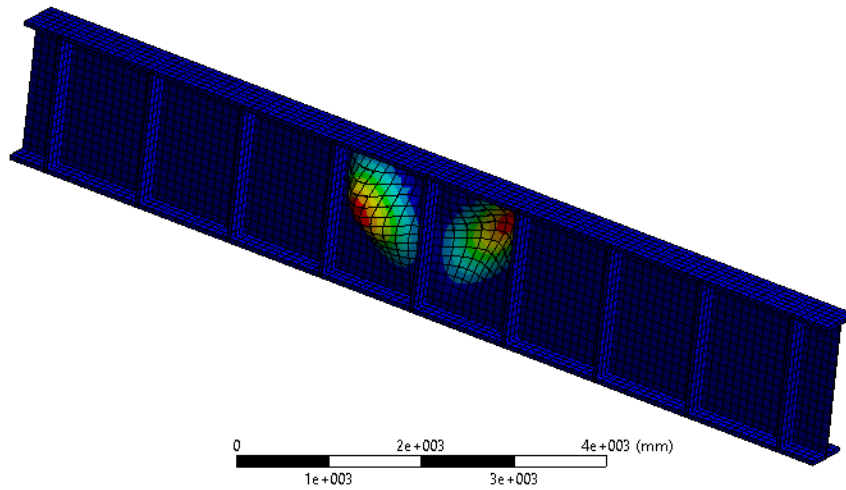


Figura 4.22. Primer modo de pandeo. Viga 1600-12. 3 rig

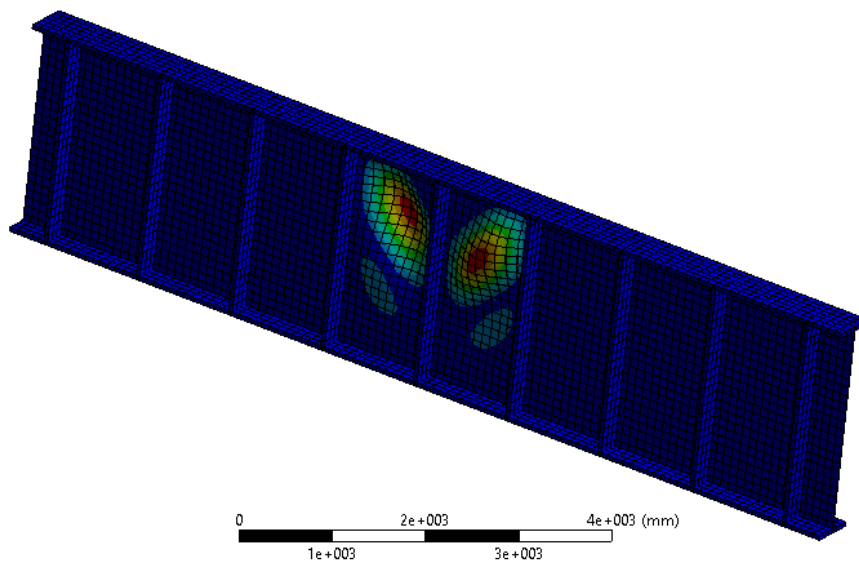


Figura 4.23. Primer modo de pandeo. Viga 2400-6. 3 rig

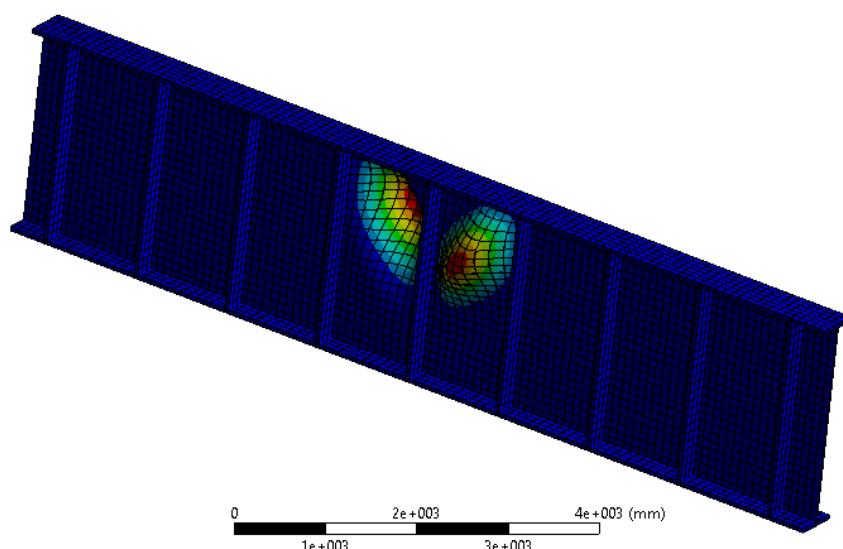


Figura 4.24. Primer modo de pandeo. Viga 2400-9. 3 rig

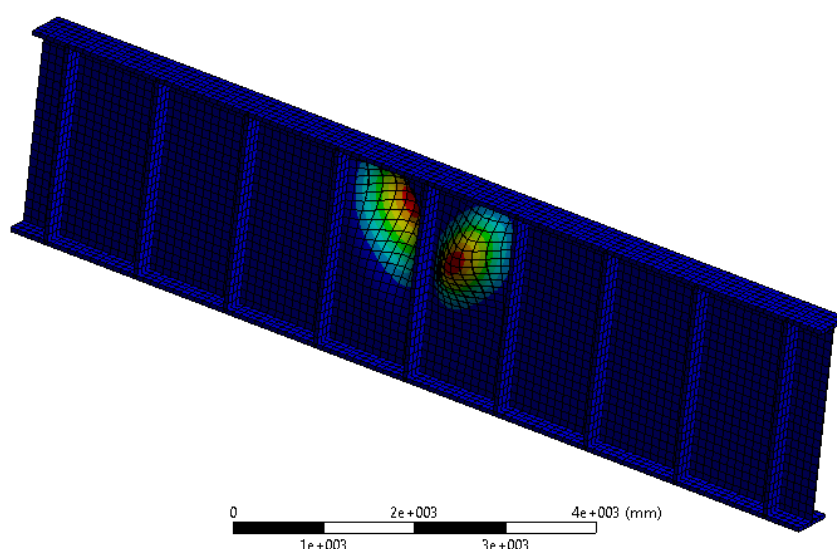


Figura 4.25. Primer modo de pandeo. Viga 2400-12. 3 rig

4.2 Descripción del modelos de Elementos Finitos

El modelo de elementos finitos empleado en el análisis de vigas de alma plana es idéntico al descrito en el capítulo anterior relativo a las vigas de alma corrugada. No obstante repasaremos los aspectos más importantes.

El software empleado fue ANSYS Structural Analysis. El tamaño máximo de los elementos que componen la malla se fijó en 100 mm y se adoptó para estos una forma preferentemente cuadrática. En la Figura 4.1 mostrada previamente podemos ver el aspecto de nuestra malla para vigas de alma plana.

El material, el mismo que para las vigas de alma corrugada, se trata de un acero S-355 con límite elástico de 355 MPa, tensión última igual a 510 MPa y comportamiento bilineal.

En cuanto a las condiciones de contorno, estas son similares a las empleadas en vigas de alma corrugada.

A pesar de que muchos de los modelos estudiados cuentan con rigidizadores intermedios, y tienen, por tanto, más rigidizadores que los tres empleados en las vigas corrugadas, la limitación del desplazamiento a lo largo del eje Z solo se aplica a los tres rigidizadores fijos. Sucede lo mismo con el resto de condiciones de contorno, ninguna de las cuales afecta a los rigidizadores intermedios.

La Figura 4.26 y la Tabla 4.2 que aparecen a continuación muestran las condiciones de contorno para el caso de la viga de alma plana con 0 rigidizadores, no obstante, como las condiciones de contorno no afectan a los rigidizadores intermedios, dichas condiciones son las mismas para los casos de vigas con 1, 2 y 3 rigidizadores intermedios.

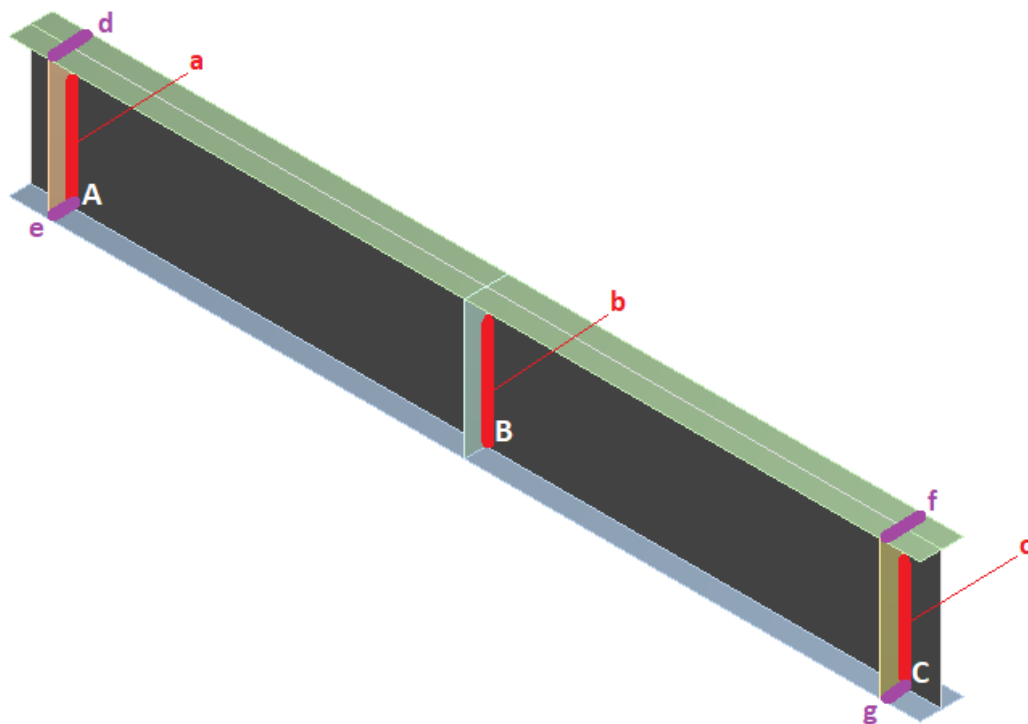


Figura 4.26. Vista de los elementos con limitaciones de movimiento en viga de alma plana

	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
Eje a	Libre	Libre	0	Fijo	Libre	Libre
Eje b	Libre	Libre	0	-	-	-
Eje c	Libre	Libre	0	Fijo	Libre	Libre
Eje d	-	-	-	Fijo	Libre	Libre
Eje e	-	-	-	Fijo	Libre	Libre
Eje f	-	-	-	Fijo	Libre	Libre
Eje g	-	-	-	Fijo	Libre	Libre
Punto A	Libre	0	Libre	-	-	-
Punto B	0	Libre	Libre	-	-	-
Punto C	Libre	0	Libre	-	-	-

Tabla 4.2. Condiciones de contorno viga de alma plana

Finalmente, para el estudio del comportamiento de la viga hasta su estado límite último se aplicó un desplazamiento al eje *b*, midiendo al mismo tiempo la fuerza de reacción resultante en dicho eje. En definitiva, se repitió el proceso llevado a cabo con las vigas de alma corrugada.

4.3 Curvas Fuerza-Desplazamiento

Procederemos ahora a mostrar las curvas Fuerza-Desplazamiento obtenidas del análisis de vigas de alma plana. Dichas curvas se agrupan en gráficos de tres en tres. En cada gráfico, Figuras 4.27 a 4.34, se recogen las curvas resultantes correspondientes a los tres espesores estudiados, 6, 9 y 12 mm, para una altura y número de rigidizadores intermedios determinado. Empezamos por 0 rigidizadores intermedios y 1600 mm de altura del alma y concluimos por 3 rigidizadores intermedios y 2400 mm de altura del alma.

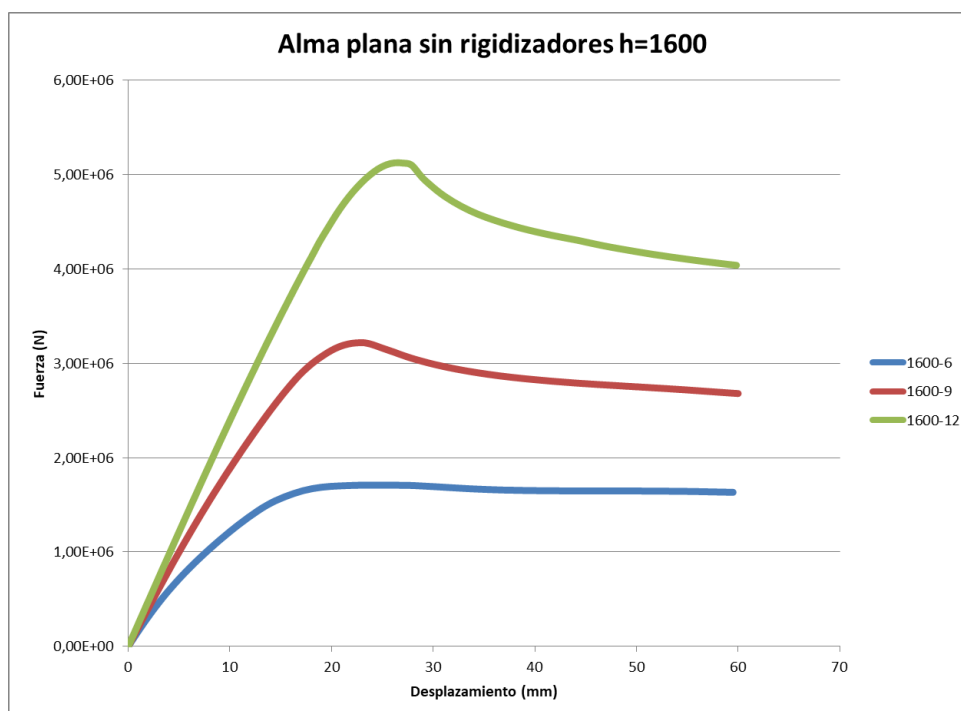


Figura 4.27. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 0 rigidizadores. h=1600

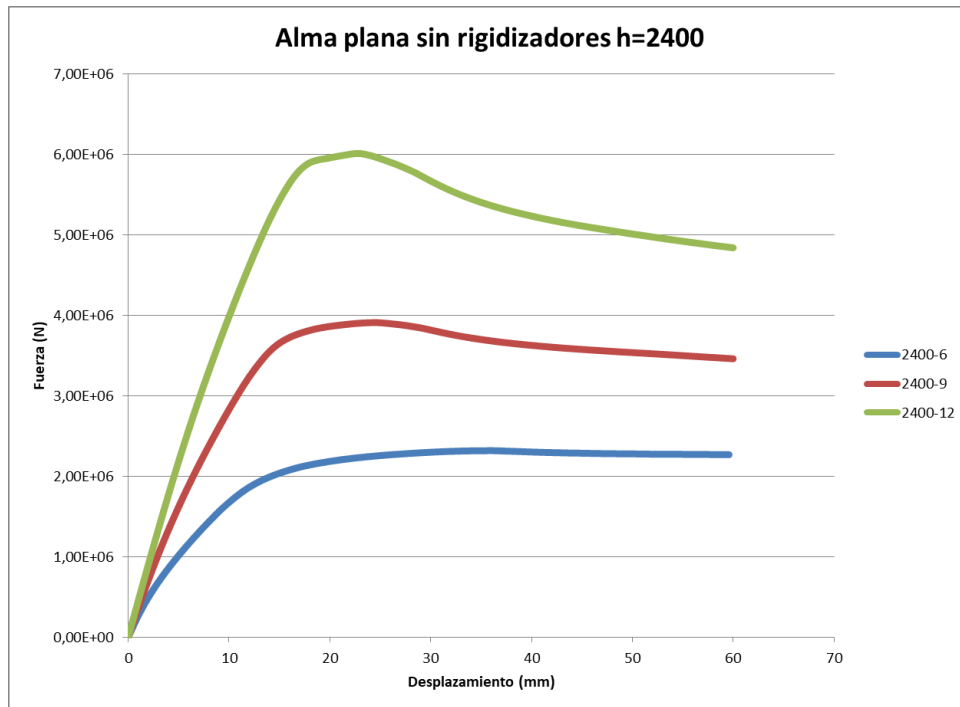


Figura 4.28. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 0 rigidizadores. h=2400

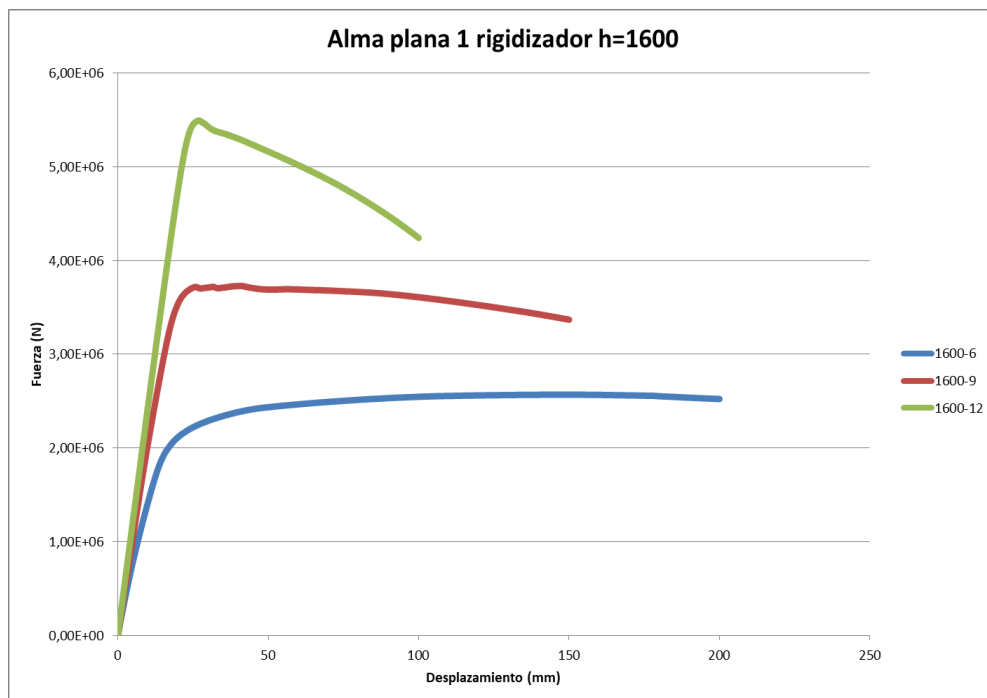


Figura 4.29. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 1 rigidizador. h=1600

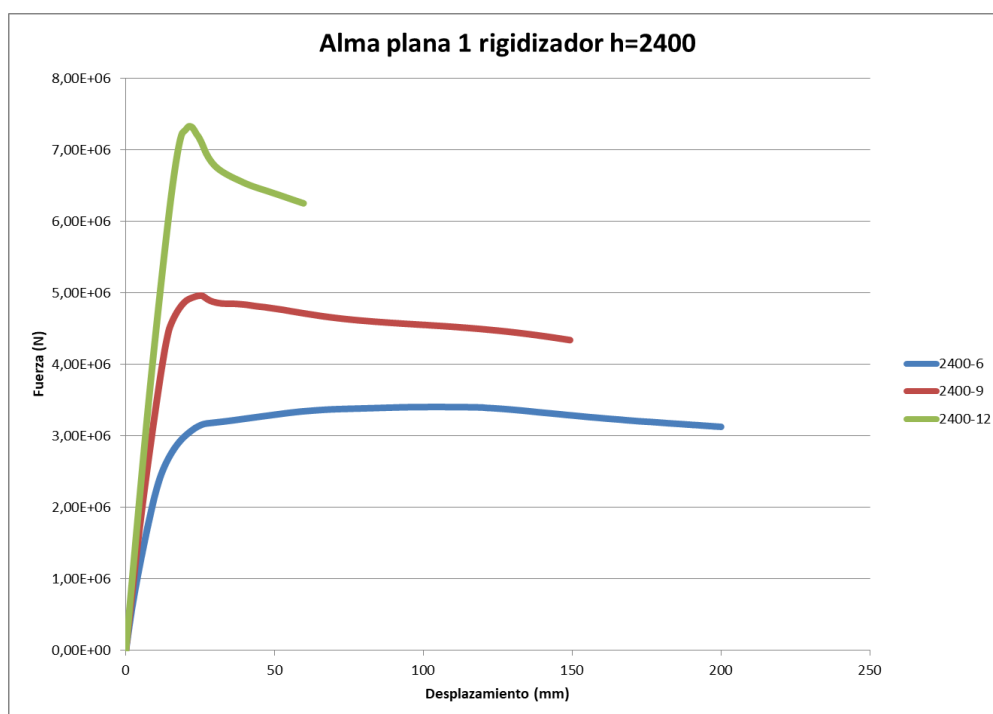


Figura 4.30. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 1 rigidizador. h=2400

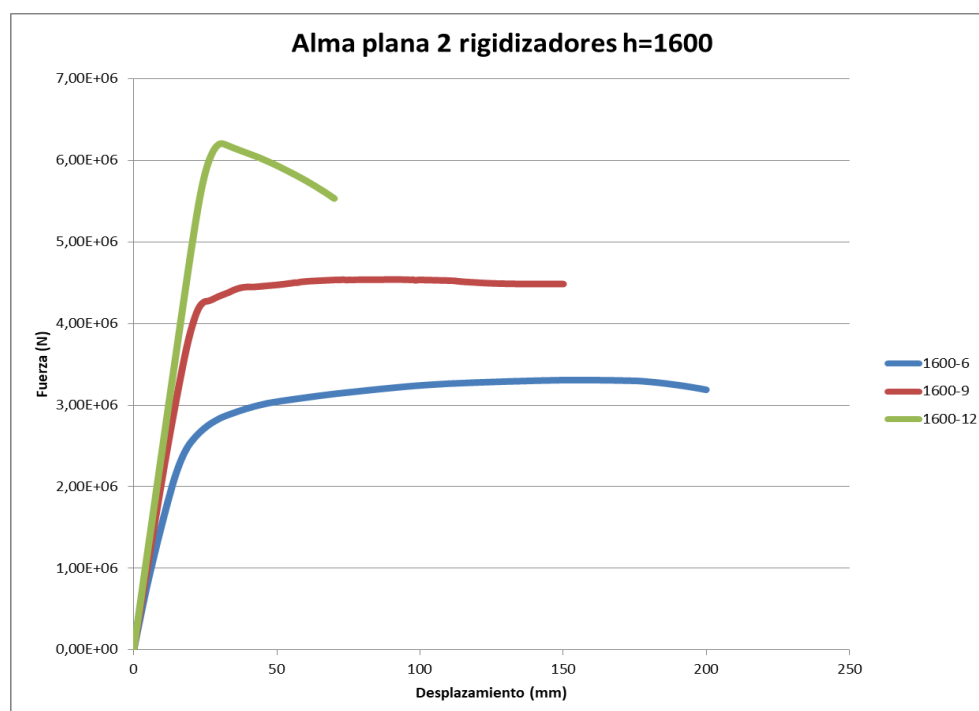


Figura 4.31. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 2 rigidizadores. h=1600

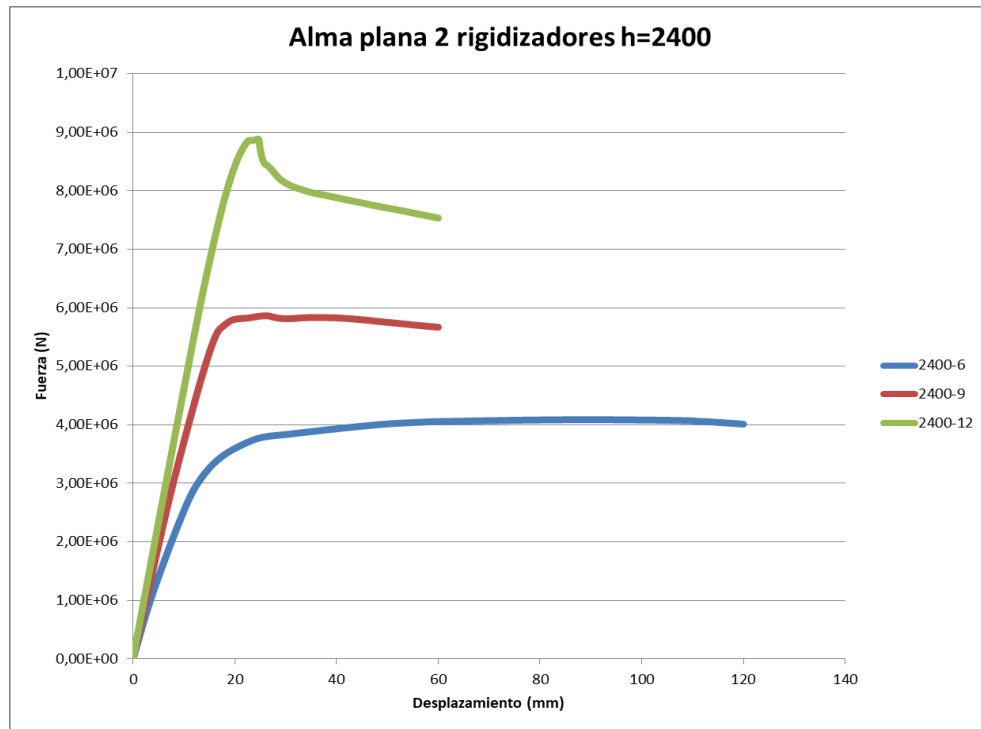


Figura 4.32. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 2 rigidizadores. h=2400

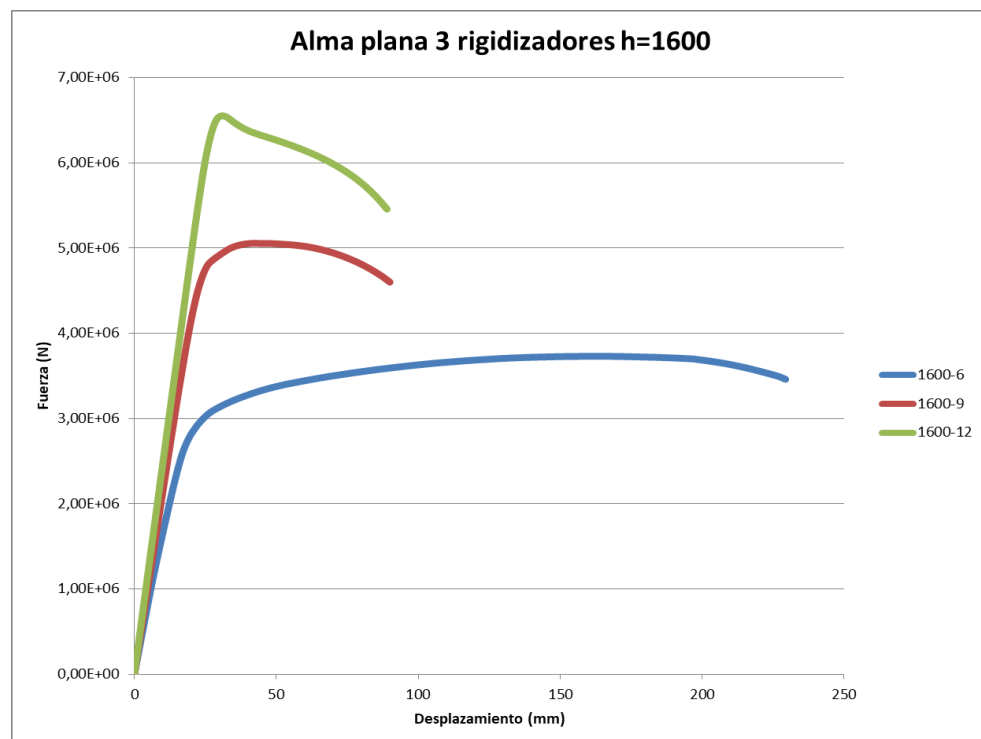


Figura 4.33. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 3 rigidizadores. h=1600

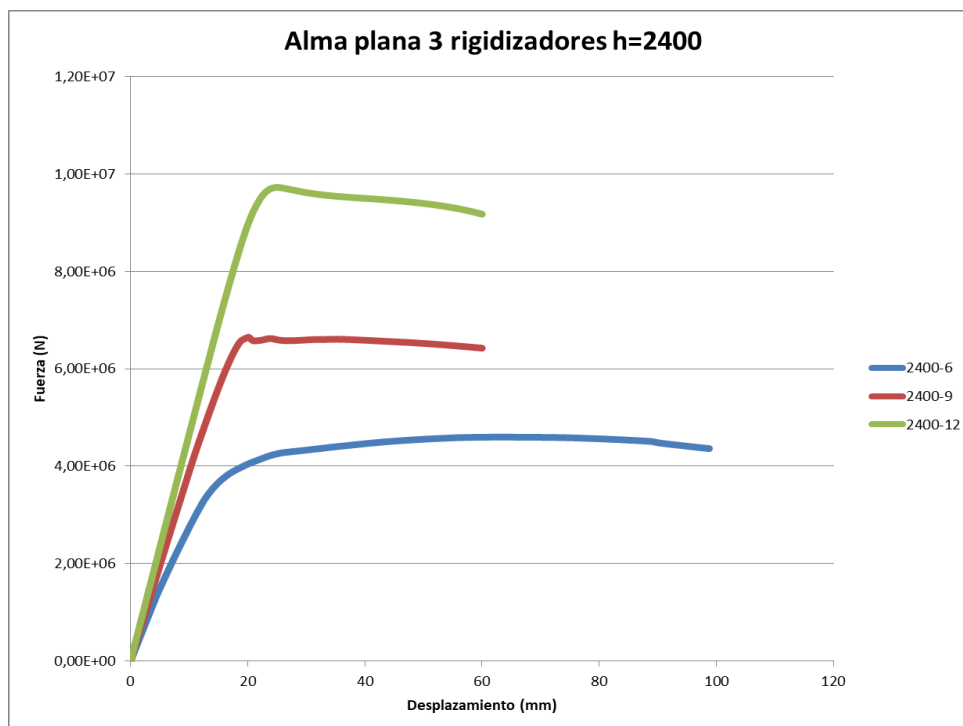


Figura 4.34. Curvas Fuerza-Desplazamiento. Vigas de alma plana 3 rigidizadores. $h=2400$

A vista de los resultados obtenidos podemos observar una evolución en las curvas Fuerza-Desplazamiento con el espesor, independientemente de la altura del alma y del número de rigidizadores intermedios existente.

Cuando el espesor del alma es pequeño, $t_w = 6 \text{ mm}$, la curvas no presentan una evidente linealidad en la zona elástica sino que presentan un comportamiento dúctil con gran aumento del desplazamiento para pequeños incrementos de carga. La rigidez en el tramo elástico dista mucho de ser constante.

Al aumentar el espesor del alma, para valores de 9 y 12 mm, las curvas ganan linealidad en la zona elástica inicial. Estamos ante un sistema más rígido y más resistente, con una pendiente que tiende a ser constante en la zona elástica. Estos sistemas son, sin embargo, más frágiles, pues como vemos en las curvas, presentan un pico, correspondiente a la resistencia última, con un acusado descenso posterior. Por el contrario, las curvas correspondientes a espesores del alma pequeños son más tendidas alcanzándose la carga máxima para altos valores del desplazamiento.

En el apartado siguiente estudiaremos todos estos aspectos comentados relativos a la rigidez con más detalle.

A continuación, en las Figuras 4.35 a 4.58, se recoge el aspecto que presentaron las diferentes vigas de alma plana estudiadas en el momento

de colapso. Todas ellas se encuentran a la misma escala, por lo que resulta sencillo comparar la diferencia de deformación existente bajo carga máxima entre las mismas.

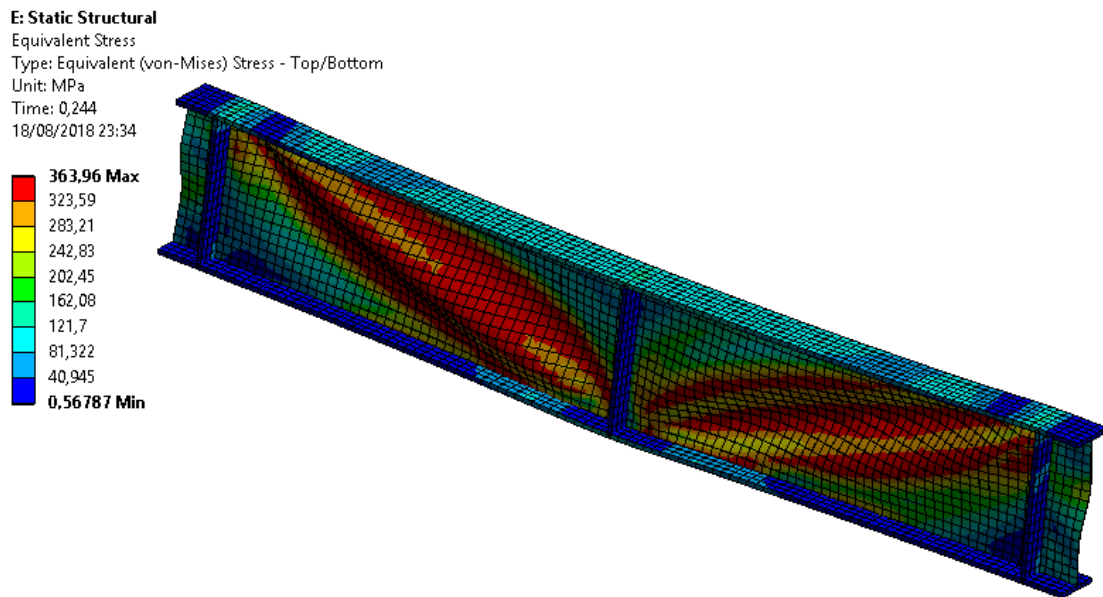


Figura 4.35. Distribución de tensiones viga alma plana 0 rig 1600-6 bajo carga máxima

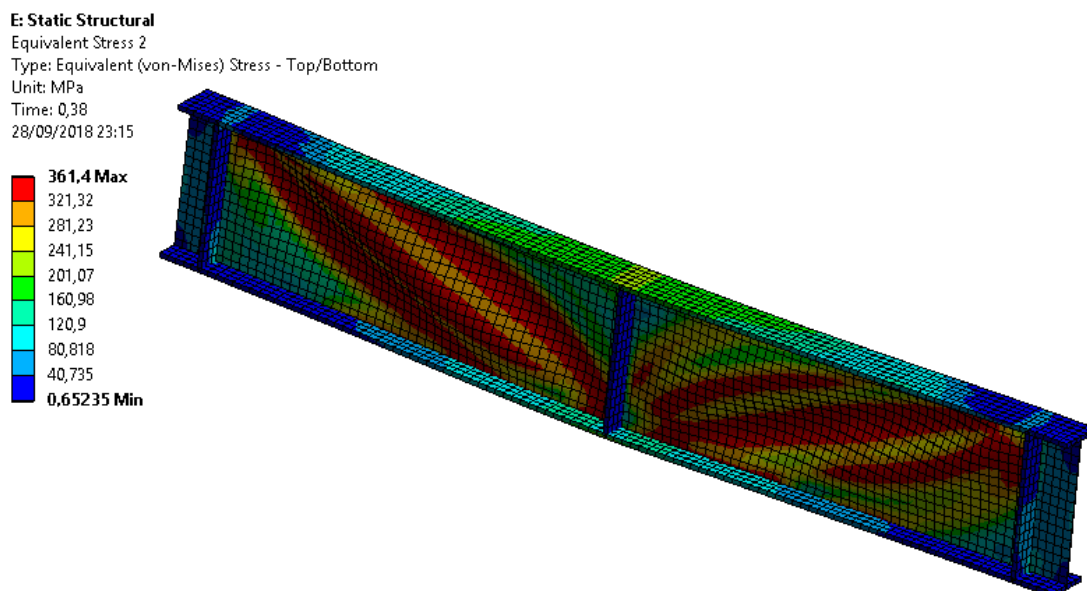


Figura 4.36. Distribución de tensiones viga alma plana 0 rig 1600-9 bajo carga máxima

E: Static Structural

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 0,262

21/08/2018 18:28

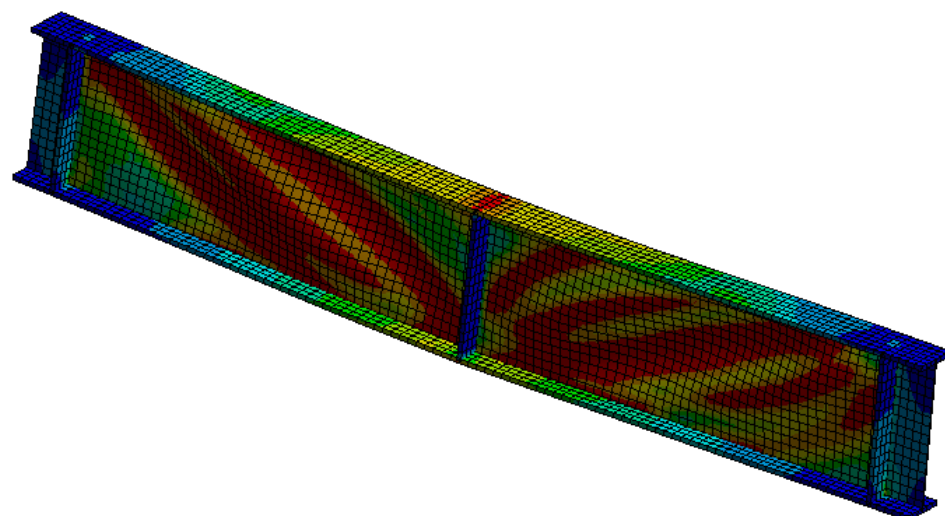
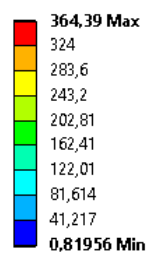


Figura 4.37. Distribución de tensiones viga alma plana 0 rig 1600-12 bajo carga máxima

E: Static Structural

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 0,36257

24/08/2018 12:14

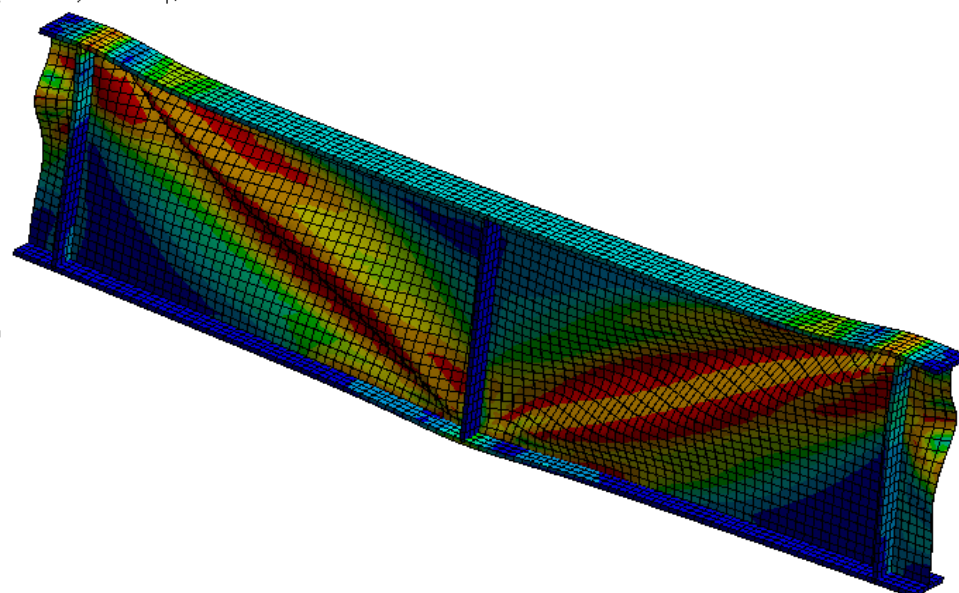
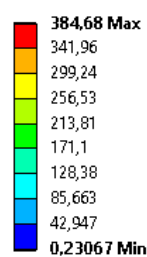


Figura 4.38. Distribución de tensiones viga alma plana 0 rig 2400-6 bajo carga máxima

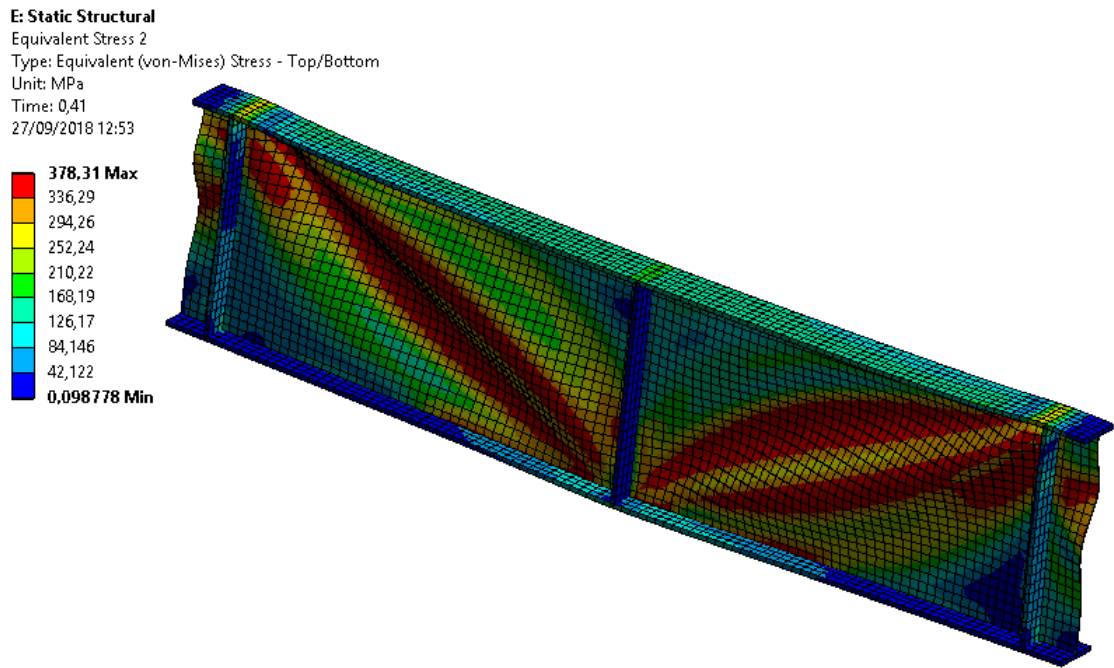


Figura 4.39. Distribución de tensiones viga alma plana 0 rig 2400-9 bajo carga máxima

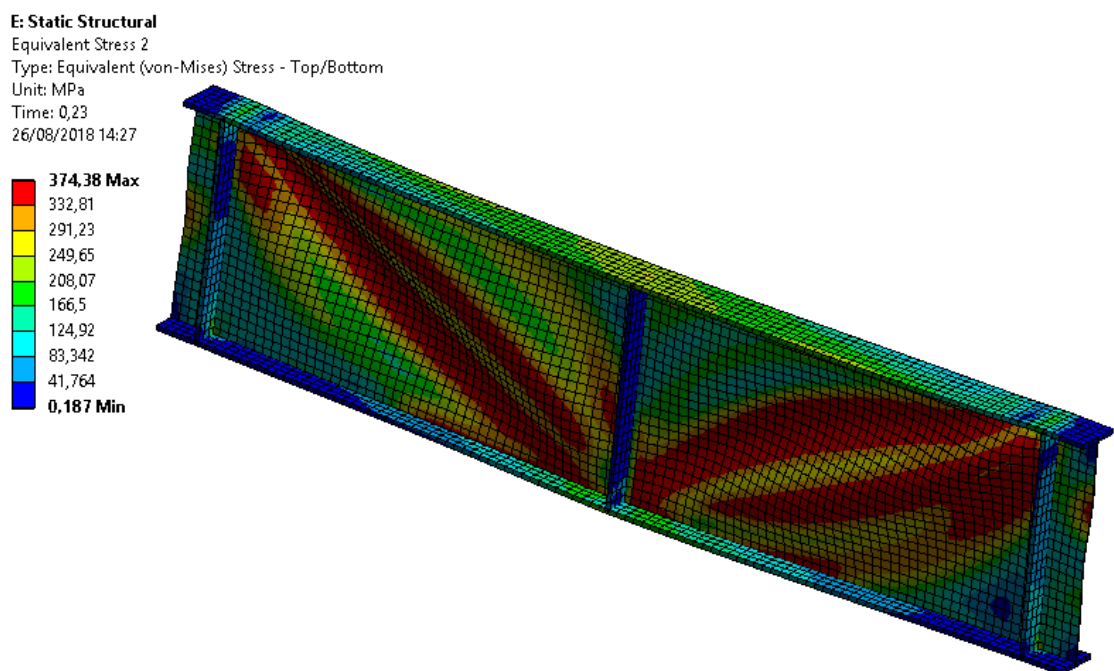


Figura 4.40. Distribución de tensiones viga alma plana 0 rig 2400-12 bajo carga máxima

E: Static Structural

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 0,73872

17/08/2018 17:48

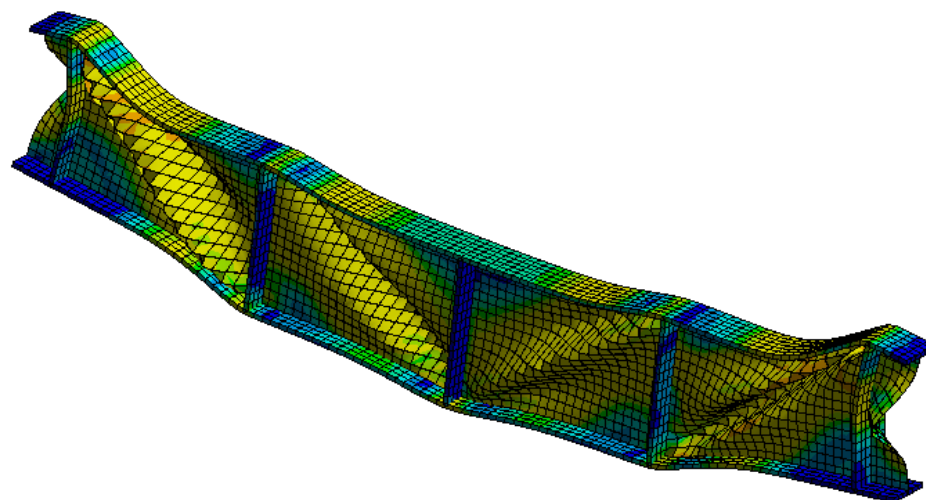
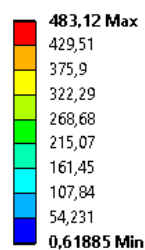


Figura 4.41. Distribución de tensiones viga alma plana 1 rig 1600-6 bajo carga máxima

E: Static Structural

Equivalent Stress 2

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 0,68

29/09/2018 22:17

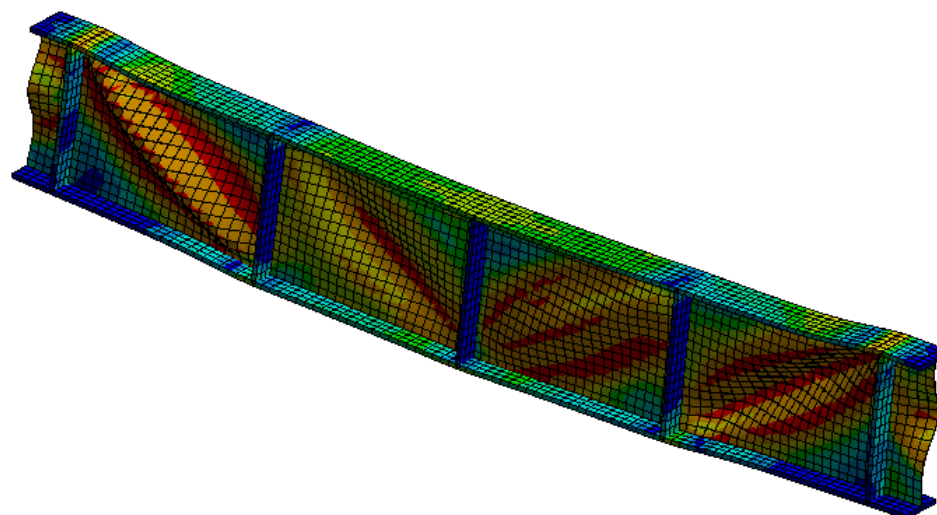
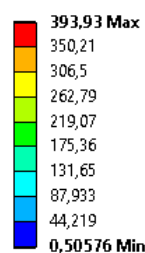


Figura 4.42. Distribución de tensiones viga alma plana 1 rig 1600-9 bajo carga máxima

E: Static Structural

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 0,27

22/08/2018 16:57

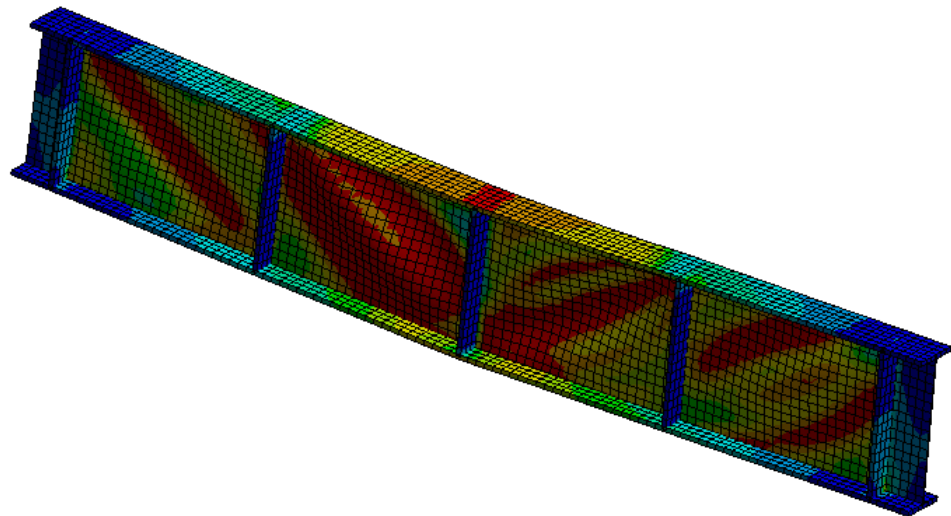
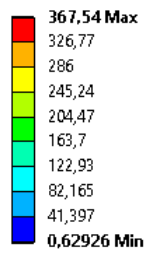


Figura 4.43. Distribución de tensiones viga alma plana 1 rig 1600-12 bajo carga máxima

E: Static Structural

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 0,50746

24/08/2018 14:35

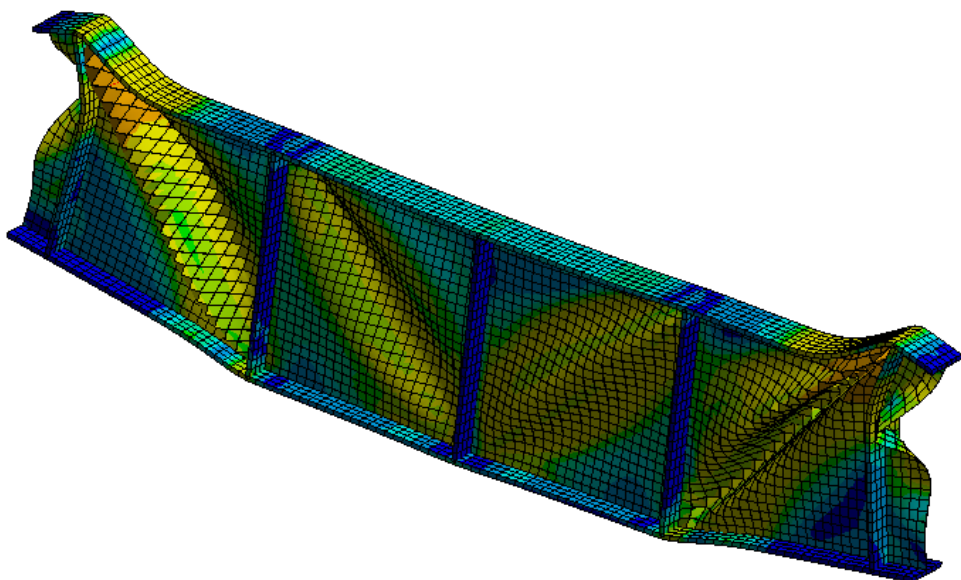
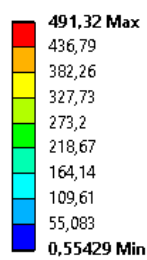


Figura 4.44. Distribución de tensiones viga alma plana 1 rig 2400-6 bajo carga máxima

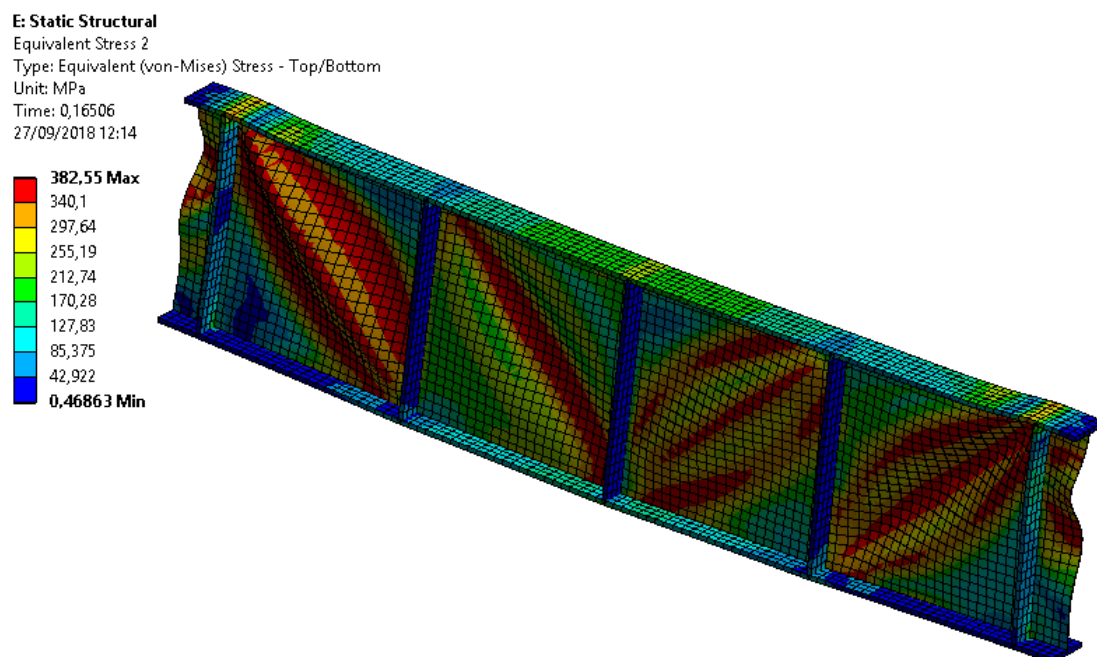


Figura 4.45. Distribución de tensiones viga alma plana 1 rig 2400-9 bajo carga máxima

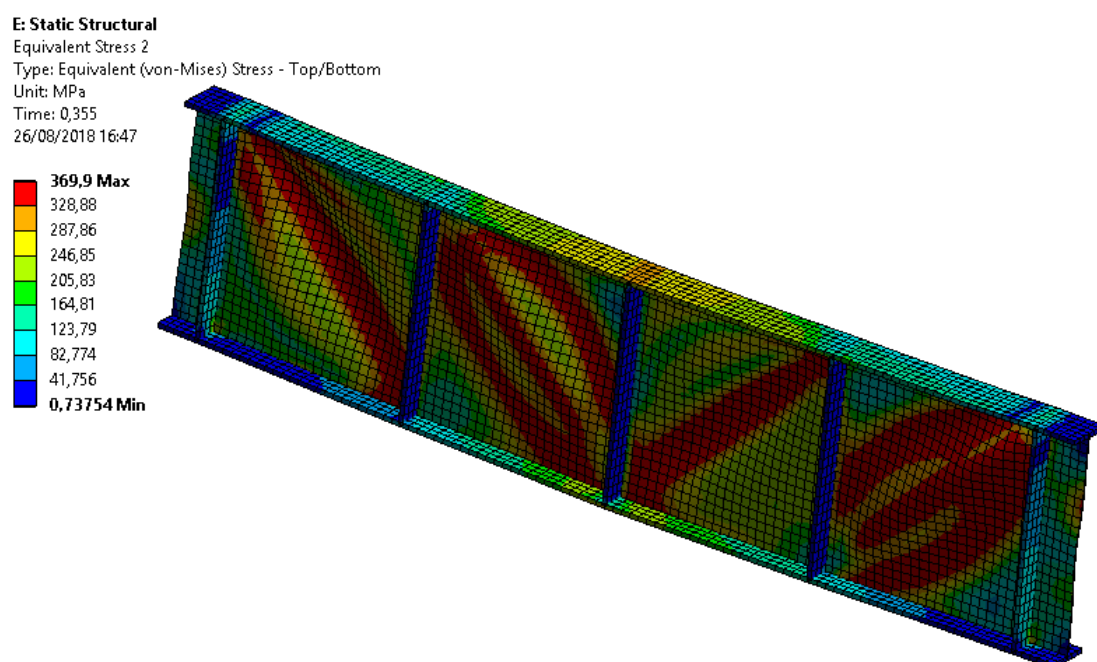


Figura 4.46. Distribución de tensiones viga alma plana 1 rig 2400-12 bajo carga máxima

E: Static Structural

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 0,62279

17/08/2018 0:51

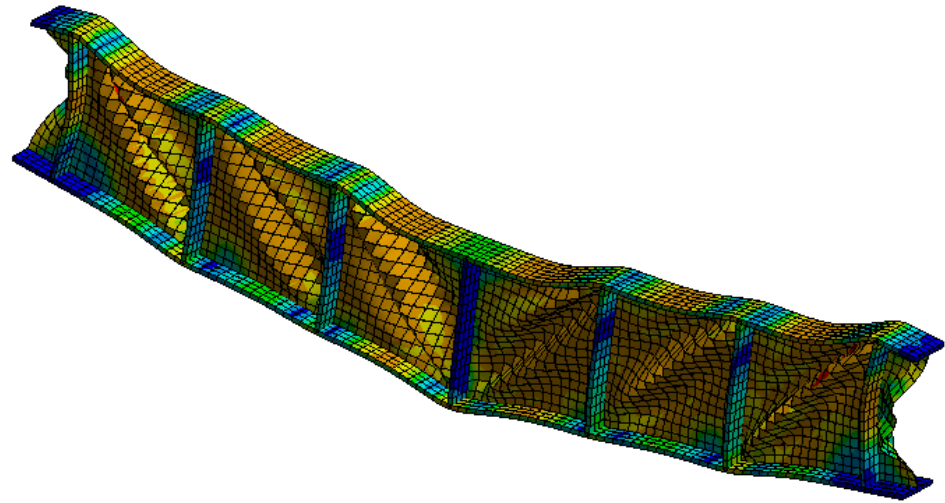
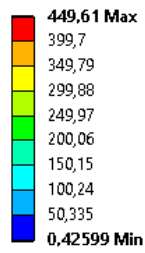


Figura 4.47. Distribución de tensiones viga alma plana 2 rig 1600-6 bajo carga máxima

E: Static Structural

Equivalent Stress 2

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 0,62253

30/09/2018 9:58

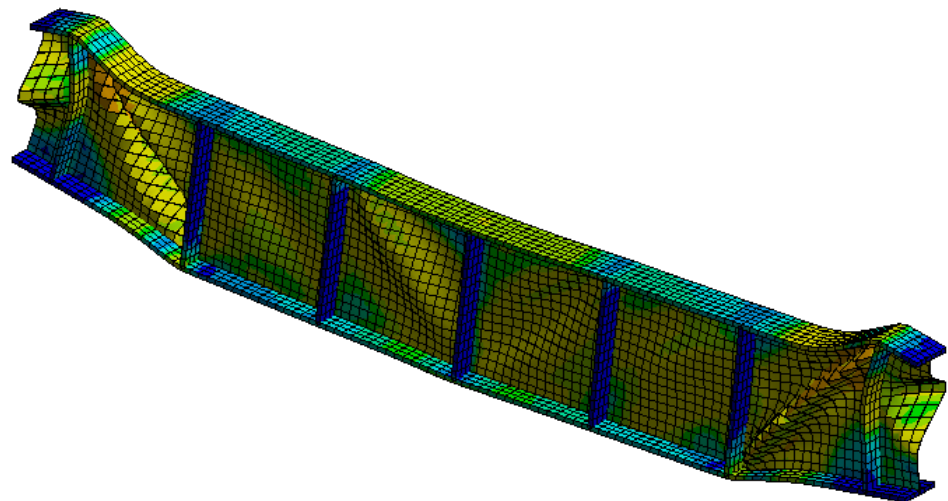
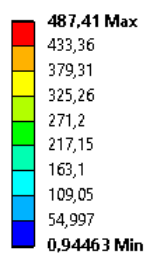


Figura 4.48. Distribución de tensiones viga alma plana 2 rig 1600-9 bajo carga máxima

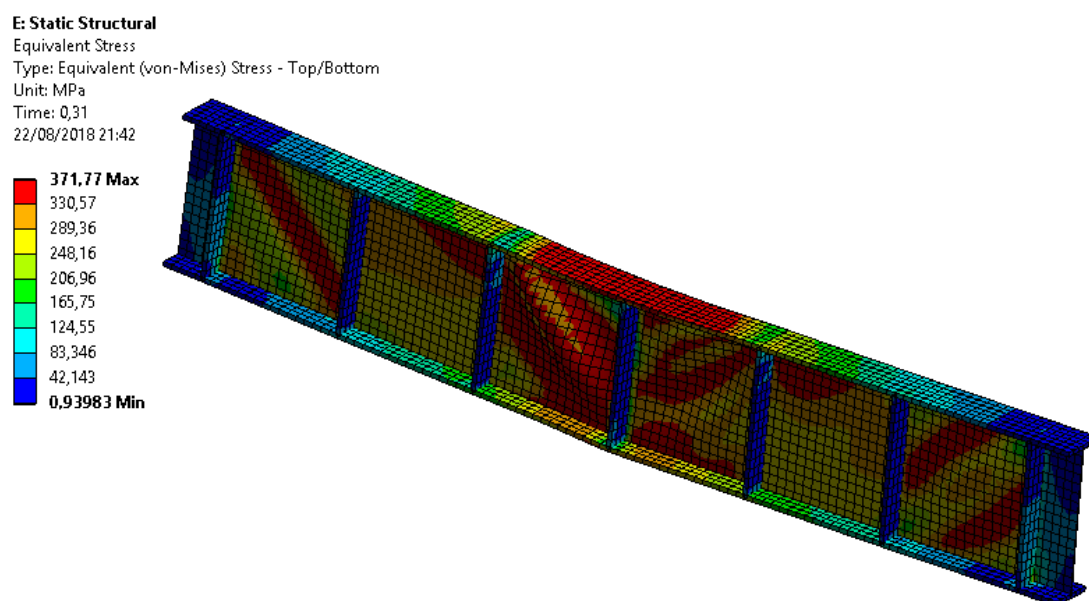


Figura 4.49. Distribución de tensiones viga alma plana 2 rig 1600-12 bajo carga máxima

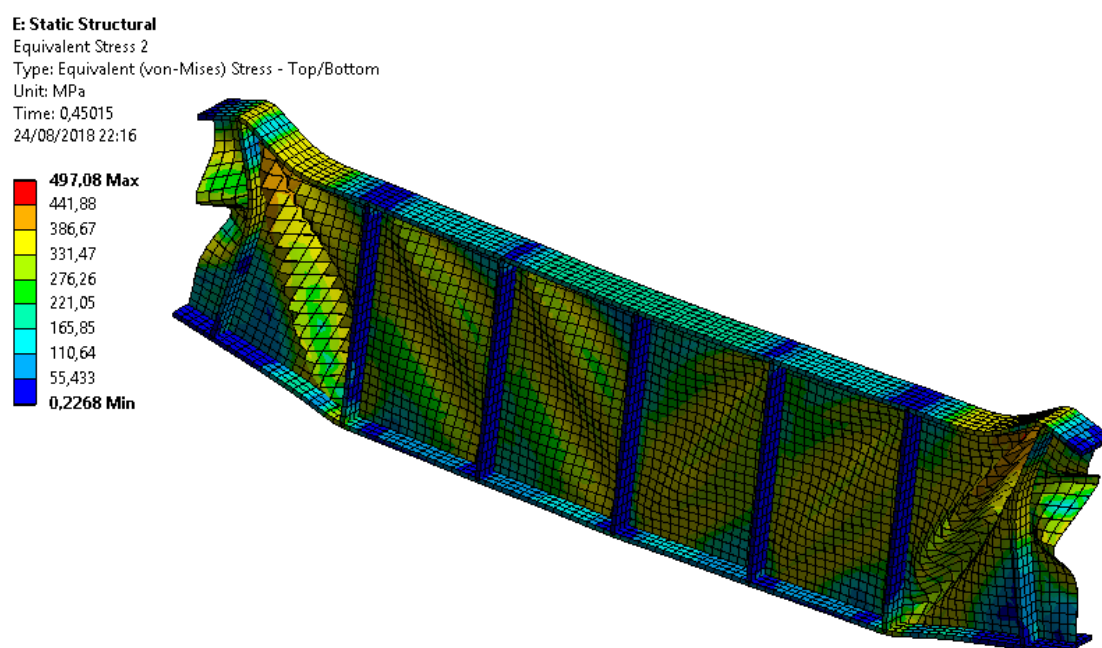


Figura 4.50. Distribución de tensiones viga alma plana 2 rig 2400-6 bajo carga máxima

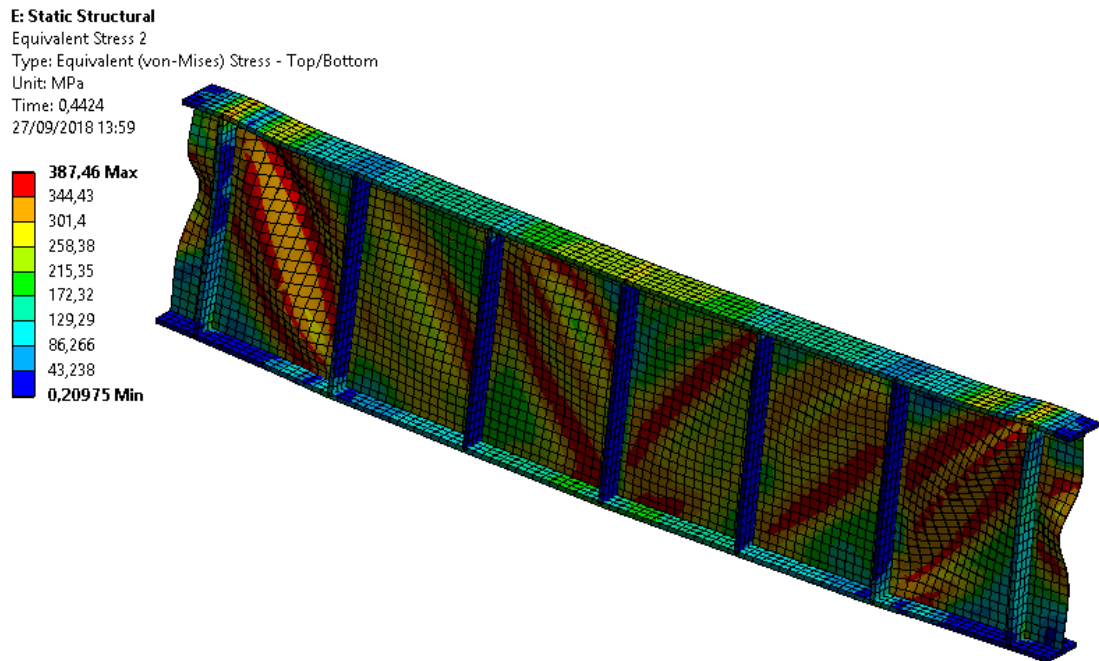


Figura 4.51. Distribución de tensiones viga alma plana 2 rig 2400-9 bajo carga máxima

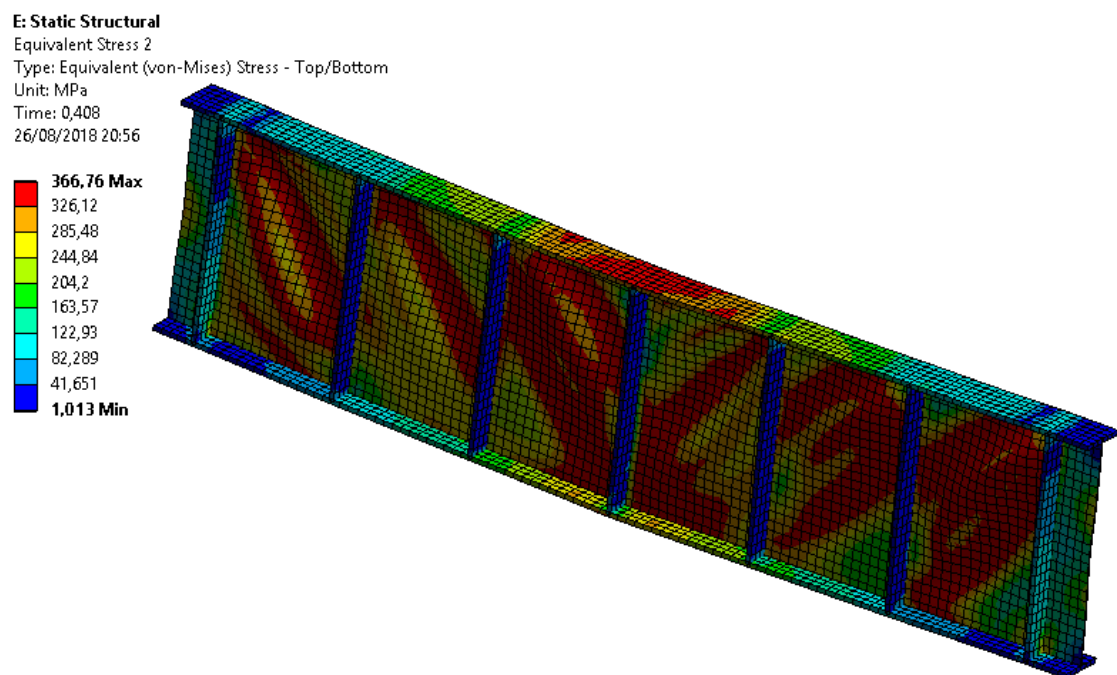


Figura 4.52. Distribución de tensiones viga alma plana 2 rig 2400-12 bajo carga máxima

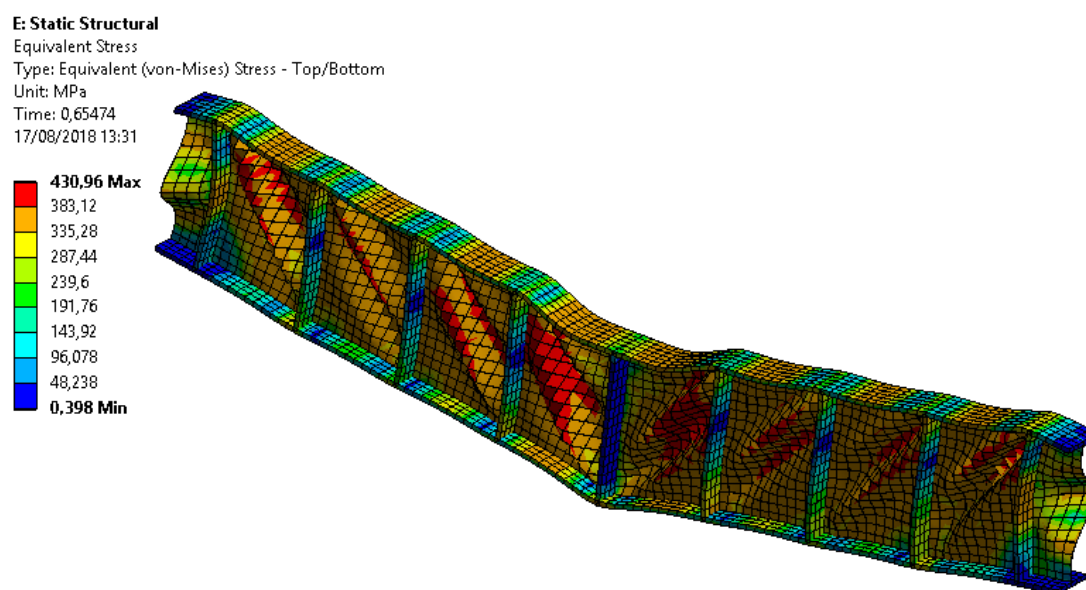


Figura 4.53. Distribución de tensiones viga alma plana 3 rig 1600-6 bajo carga máxima

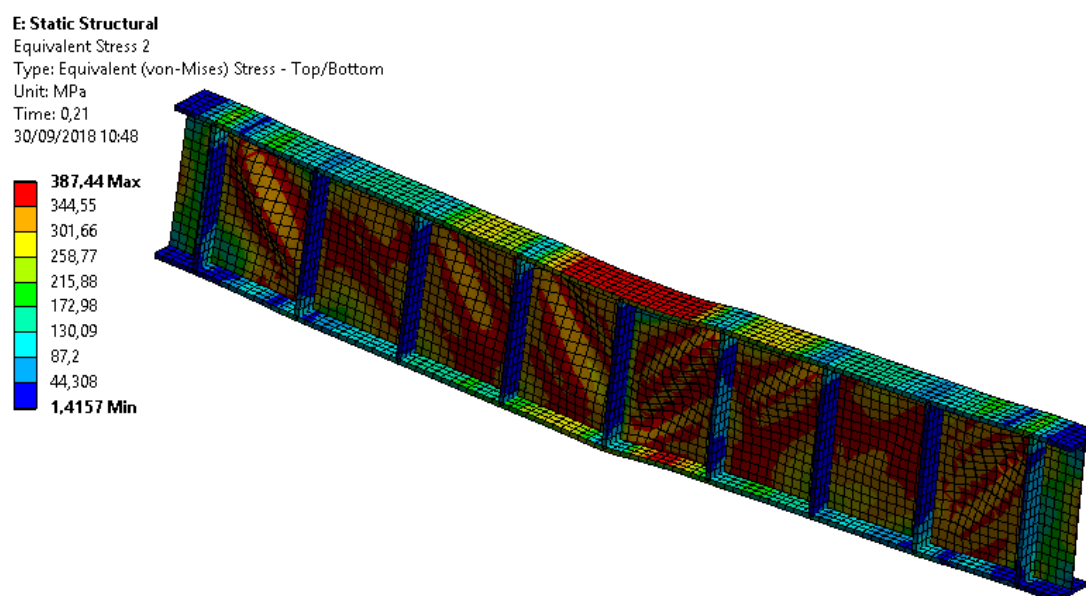


Figura 4.54. Distribución de tensiones viga alma plana 3 rig 1600-9 bajo carga máxima

E: Static Structural

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 0,31

22/08/2018 22:20

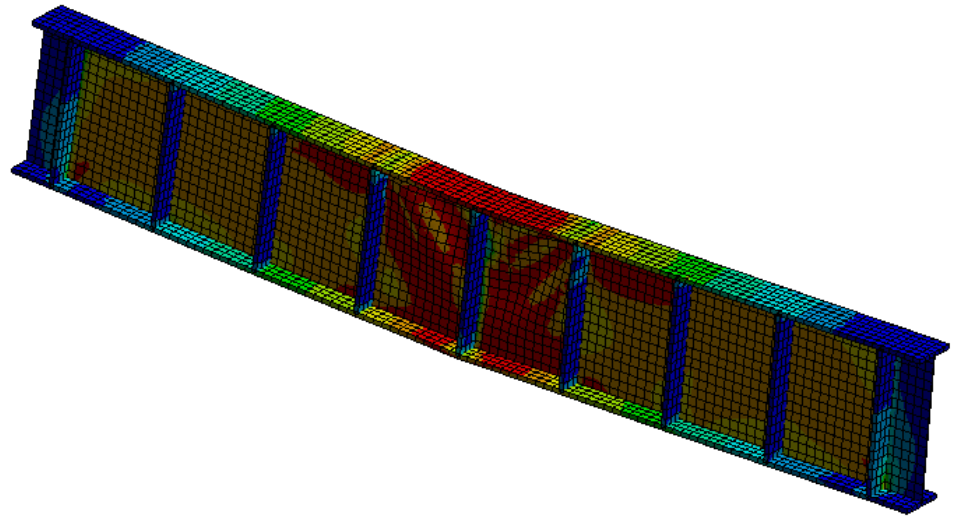
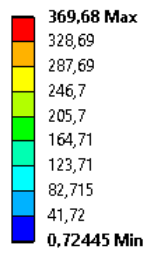


Figura 4.55. Distribución de tensiones viga alma plana 3 rig 1600-12 bajo carga máxima

E: Static Structural

Equivalent Stress 2

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 0,42662

24/08/2018 23:46

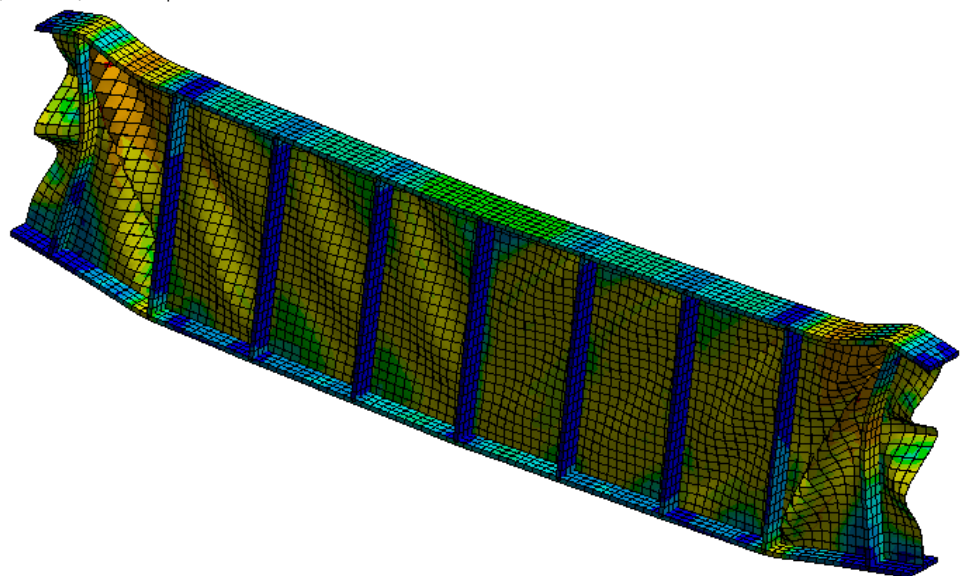
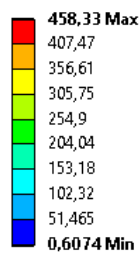


Figura 4.56. Distribución de tensiones viga alma plana 3 rig 2400-6 bajo carga máxima

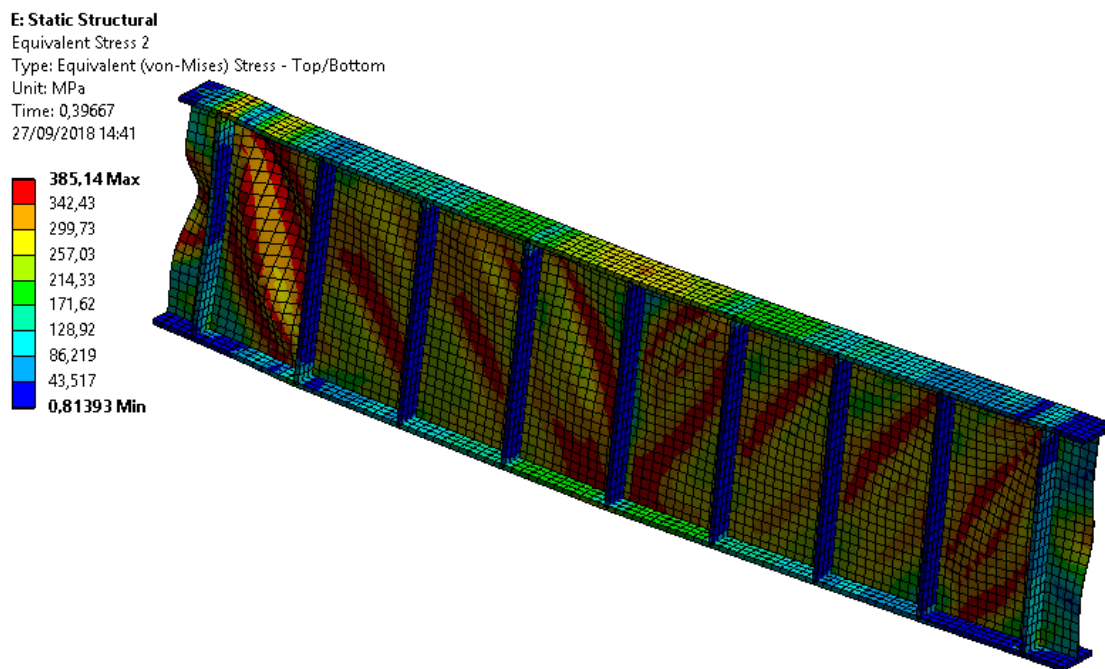


Figura 4.57. Distribución de tensiones viga alma plana 3 rig 2400-9 bajo carga máxima

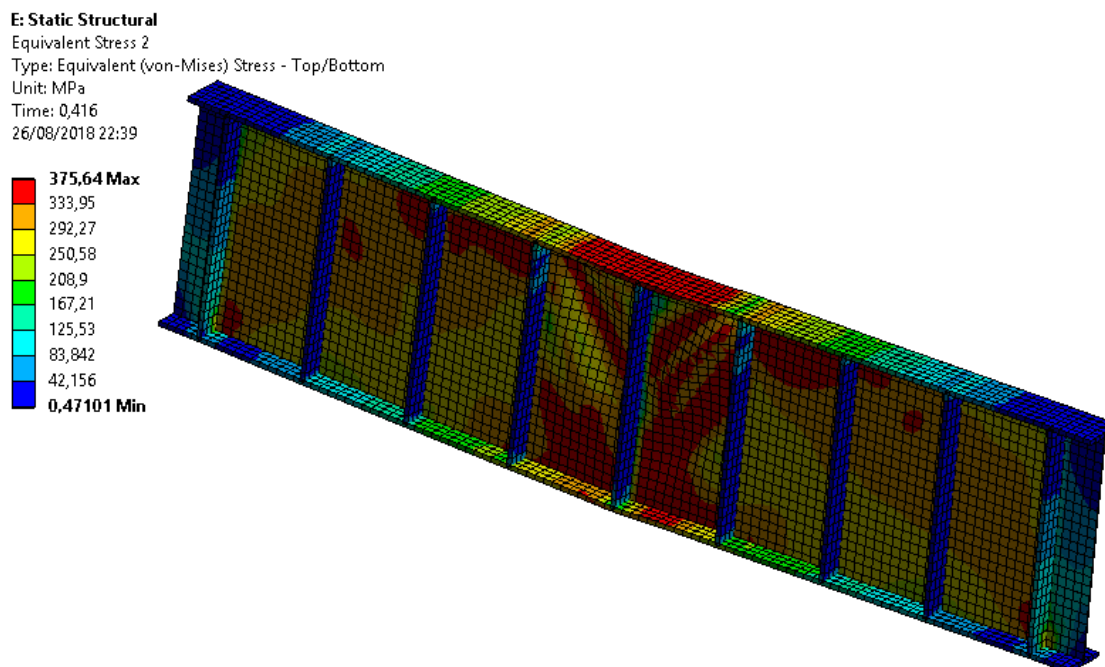


Figura 4.58. Distribución de tensiones viga alma plana 3 rig 2400-12 bajo carga máxima

Se puede observar que, en general, las vigas de pequeño espesor, $t_w = 6$, presentan una gran deformación antes de alcanzar la carga máxima.

Si analizamos con detalle el comportamiento de las vigas hasta su colapso vemos que todas ellas, a medida que van absorbiendo más carga, se van deformando simétricamente respecto al eje central vertical, tal y como observamos en la Figura 4.59:

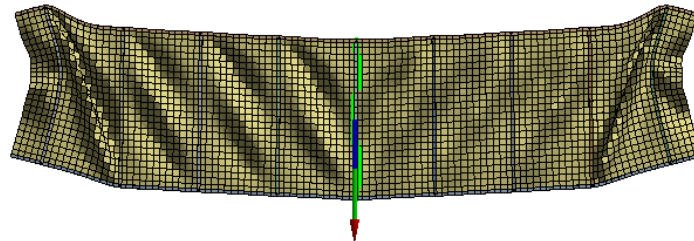


Figura 4.59. Aspecto viga alma plana antes del colapso

Sin embargo, una vez alcanzada la carga máxima el sistema se desequilibra produciéndose un fallo por cortante en el alma con formación de una línea de máxima tensión a lo largo de la diagonal de uno de los paneles planos que componen el alma comprendido entre dos rigidizadores. En la Figura 4.60, podemos ver la desestabilización de la viga, en este caso, hacia el lado izquierdo.

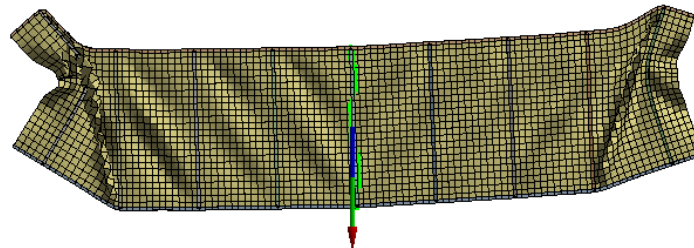


Figura 4.60. Aspecto viga alma plana después del colapso

4.4 Estudio de la rigidez

En este apartado, al igual que hicimos con las vigas de alma corrugada, procederemos a recoger los valores de la rigidez obtenidos tanto en el instante inicial como para un desplazamiento de $\delta = 10 \text{ mm}$.

Los resultados obtenidos se recogen en múltiples tablas ordenadas en diferentes subapartados en función del número de rigidizadores intermedios.

4.4.1 Alma plana sin rigidizadores

Las Tablas 4.3 y 4.4 muestran las rigideces para vigas de alma plana con 0 rigidizadores.

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Rigidez inicial (KN/mm)	Rigidez $L/1000$ (KN/mm)
1600-6	170	122
1600-9	207	189
1600-12	244	240

Tabla 4.3. Rigideces vigas de alma plana, 0 rigidizadores y h=1600

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Rigidez inicial (KN/mm)	Rigidez $L/1000$ (KN/mm)
2400-6	297	167
2400-9	368	282
2400-12	458	399

Tabla 4.4. Rigideces vigas de alma plana, 0 rigidizadores y h=2400

4.4.2 Alma plana con 1 rigidizador

Las Tablas 4.5 y 4.6 muestran las rigideces para vigas de alma plana con 1 rigidizador.

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Rigidez inicial (KN/mm)	Rigidez $L/1000$ (KN/mm)
1600-6	171	142
1600-9	212	205
1600-12	246	245

Tabla 4.5. Rigideces vigas de alma plana, 1 rigidizador y h=1600

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Rigidez inicial (KN/mm)	Rigidez $L/1000$ (KN/mm)
2400-6	301	220
2400-9	387	338
2400-12	464	442

Tabla 4.6. Rigideces vigas de alma plana, 1 rigidizador y h=2400

4.4.3 Alma plana con 2 rigidizadores

Las Tablas 4.7 y 4.8 muestran las rigideces para vigas de alma plana con 2 rigidizadores.

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Rigidez inicial (KN/mm)	Rigidez $L/1000$ (KN/mm)
1600-6	174	156
1600-9	214	212
1600-12	247	246

Tabla 4.7. Rigideces vigas de alma plana, 2 rigidizadores y $h=1600$

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Rigidez inicial (KN/mm)	Rigidez $L/1000$ (KN/mm)
2400-6	304	253
2400-9	391	370
2400-12	467	461

Tabla 4.8. Rigideces vigas de alma plana, 2 rigidizadores y $h=2400$

4.4.4 Alma plana con 3 rigidizadores

Las Tablas 4.9 y 4.10 muestran las rigideces para vigas de alma plana con 3 rigidizadores.

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Rigidez inicial (KN/mm)	Rigidez $L/1000$ (KN/mm)
1600-6	175	166
1600-9	216	214
1600-12	248	247

Tabla 4.9. Rigideces vigas de alma plana, 3 rigidizadores y $h=1600$

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Rigidez inicial (KN/mm)	Rigidez $L/1000$ (KN/mm)
2400-6	306	274
2400-9	394	389
2400-12	468	465

Tabla 4.10. Rigideces vigas de alma plana, 3 rigidizadores y $h=2400$

Una vez expuestos los resultados analizaremos la diferencia, en porcentaje respecto a la rigidez inicial, entre la rigidez inicial y la rigidez para un desplazamiento de 10 mm para cada uno de los casos.

$$\Delta R(\%) = \frac{R_{inicial} - R_{L/1000}}{R_{inicial}} \times 100 \quad (4.1)$$

El valor de dicha diferencia puede contemplarse en la Tabla 4.11, mostrada a continuación.

	Tipo viga	$\Delta R(\%)$	Tipo viga	$\Delta R(\%)$
0 rigidizadores	1600-6	28	2400-6	43,8
	1600-9	8,7	2400-9	23,4
	1600-12	1,6	2400-12	12,9
1 rigidizador	1600-6	17	2400-6	26,9
	1600-9	3,3	2400-9	12,7
	1600-12	0,4	2400-12	4,7
2 rigidizadores	1600-6	10,3	2400-6	16,8
	1600-9	0,9	2400-9	5,4
	1600-12	0,4	2400-12	1,3
3 rigidizadores	1600-6	5,1	2400-6	10,5
	1600-9	0,9	2400-9	1,3
	1600-12	0,4	2400-12	0,6

Tabla 4.11. Variación de las rigideces entre en instante inicial y $\delta = 10 \text{ mm}$

Podemos ver a simple vista como la disminución de la rigidez en la zona elástica es menor a medida que aumenta el espesor del alma. Es decir, para espesores grandes la viga gana linealidad en la zona elástica con un valor de la rigidez que tiende a ser constante en todo el tramo.

Sucede lo mismo al aumentar el número de rigidizadores, a mayor número de rigidizadores, más lineal es la curva en la zona elástica. Este efecto, sin embargo, se ve minimizado para espesores elevados del alma donde las vigas ya presentan una gran linealidad per se con independencia del número de rigidizadores.

En cuanto a los valores absolutos de las rigideces, estas aumentan considerablemente al aumentar el espesor del alma y al aumentar la altura del mismo.

Al aumentar el número de rigidizadores, la rigidez en el tramo inicial aumenta también, pero este incremento es mucho más moderado que en los dos casos anteriores.

En las Figuras 4.61 a 4.66 que aparecen a continuación podemos ver la evolución de las curvas Fuerza-Desplazamiento en función del número de rigidizadores (0, 1, 2 y 3) para una altura y espesor del alma determinados. En definitiva, se presentan seis gráficos: a) 1600-6; b) 1600-9; c) 1600-12; d) 2400-6; e) 2400-9; y f) 2400-12.

Se observa con claridad como todas las curvas representadas se superponen en el tramo inicial, siendo dicha superposición especialmente evidente para aquellas vigas de altura 1600 mm. Dicho de otro modo, las curvas presentan pendientes similares.

Este hecho confirma lo expuesto con anterioridad: el aumento del número de rigidizadores no supone un incremento significativo en la rigidez de las vigas en el tramo inicial. No sucede lo mismo con la carga última, lo cual comentaremos en el siguiente apartado.

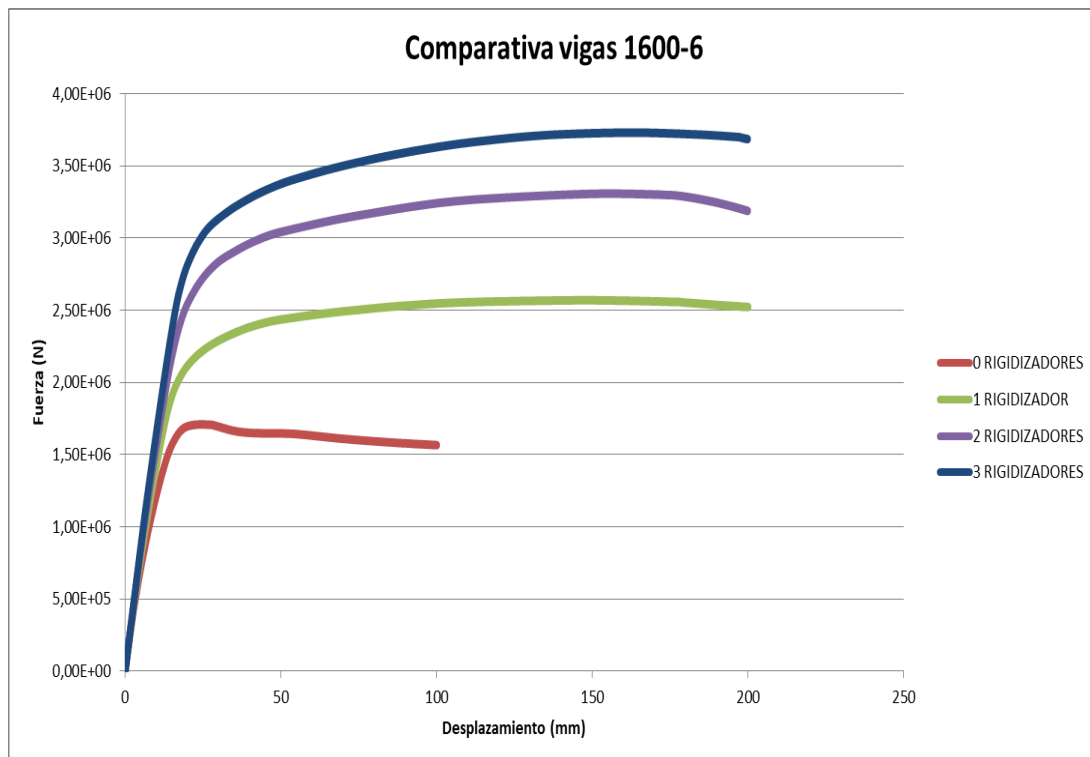


Figura 4.61. Comparativa vigas 1600-6 con diferente número de rigidizadores

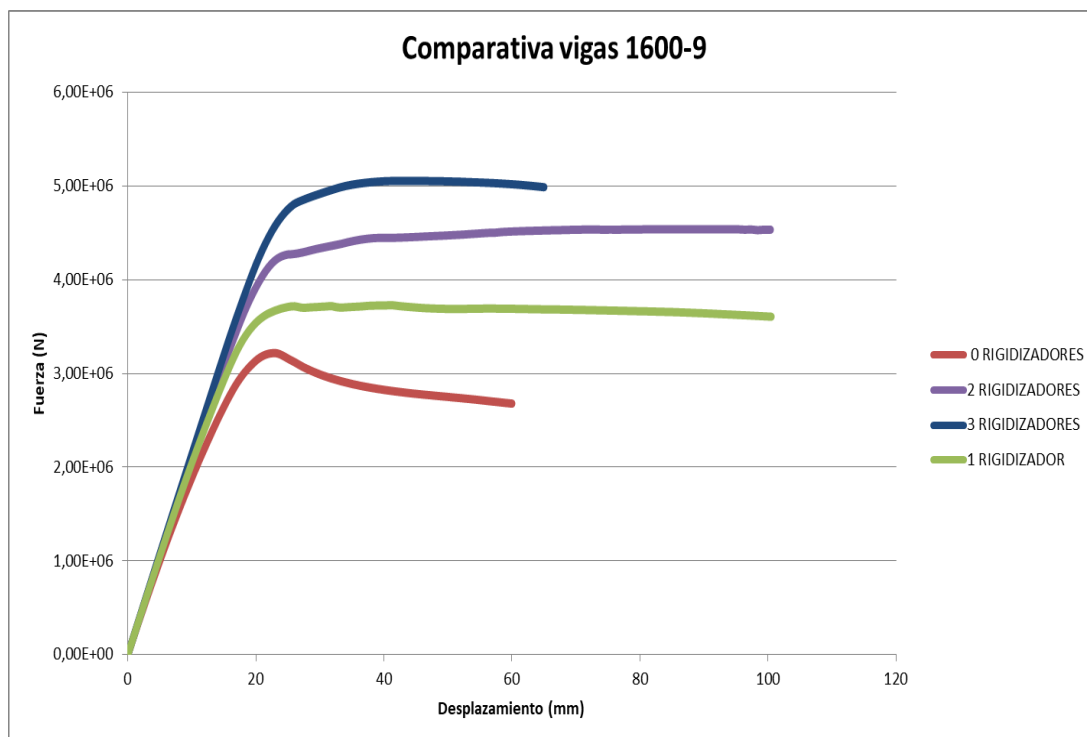


Figura 4.62. Comparativa vigas 1600-9 con diferente número de rigidizadores

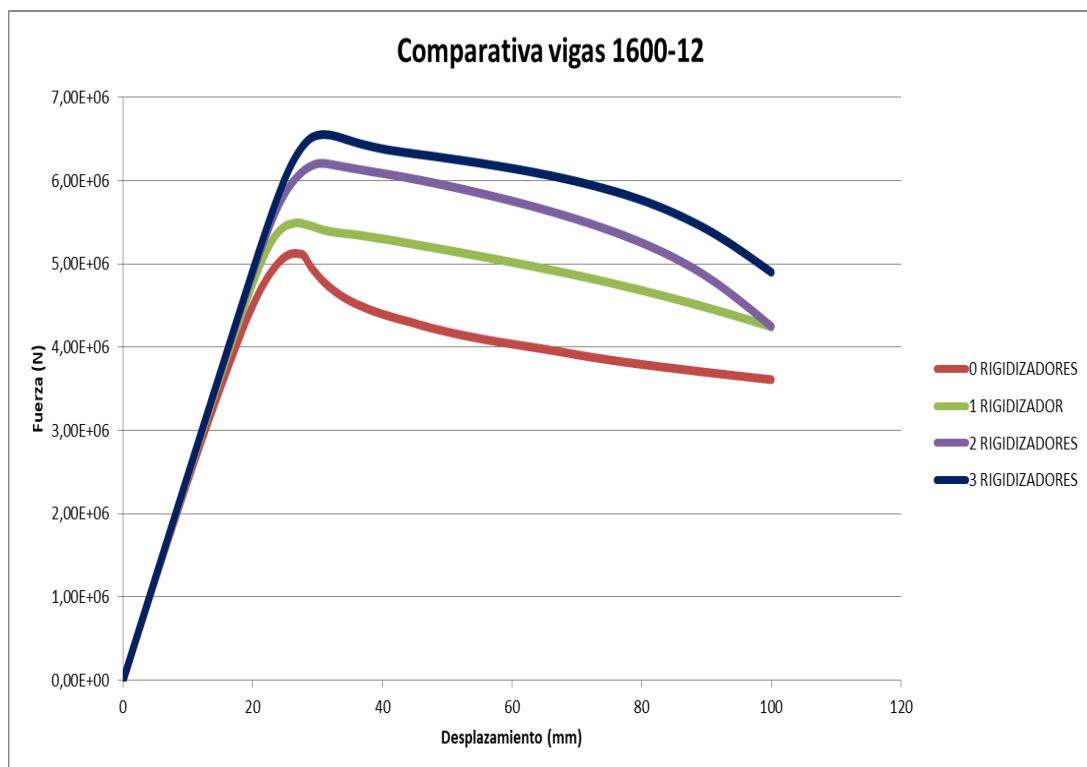


Figura 4.63. Comparativa vigas 1600-12 con diferente número de rigidizadores

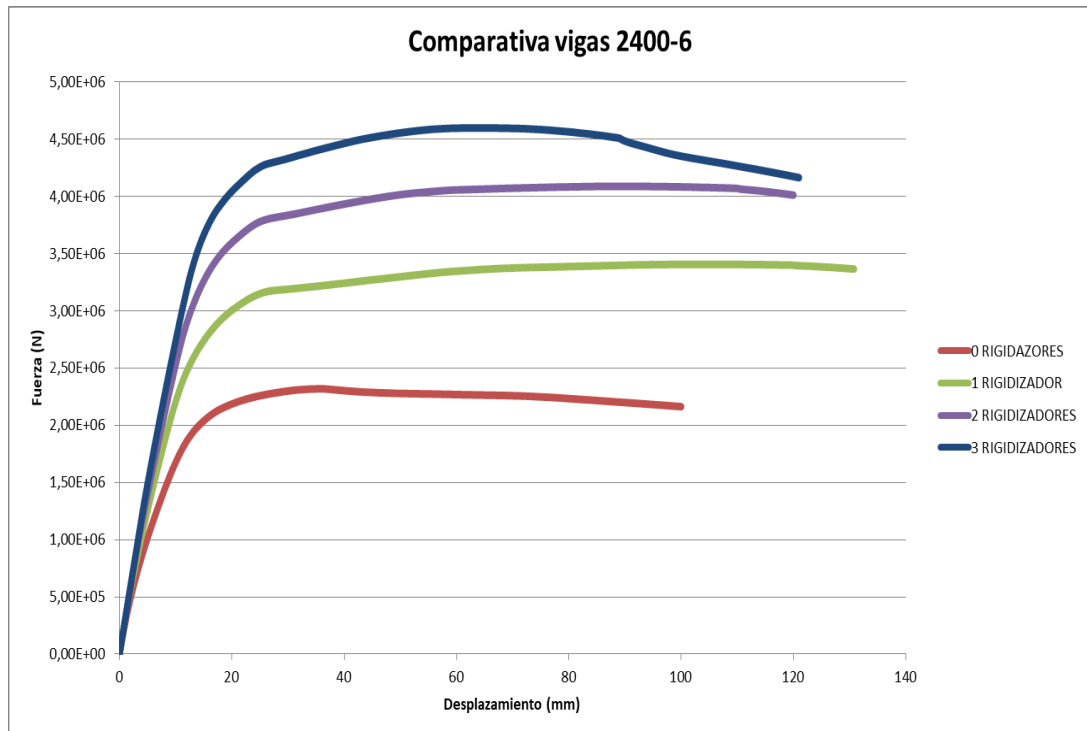


Figura 4.64. Comparativa vigas 2400-6 con diferente número de rigidizadores

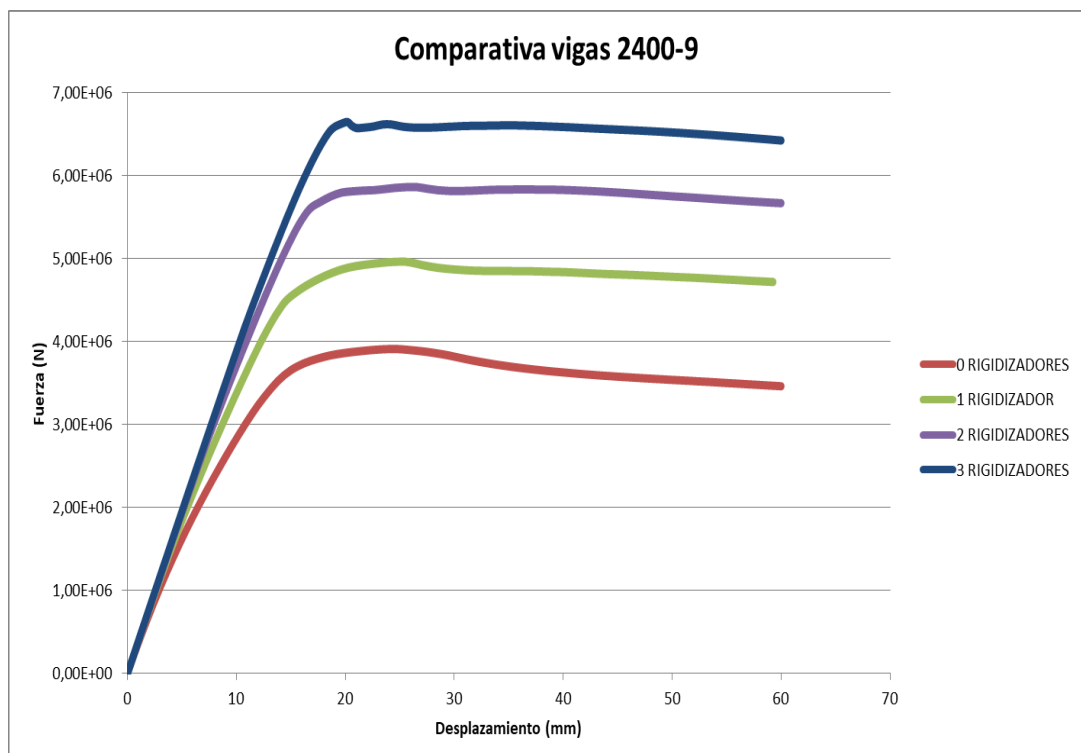


Figura 4.65. Comparativa vigas 2400-9 con diferente número de rigidizadores

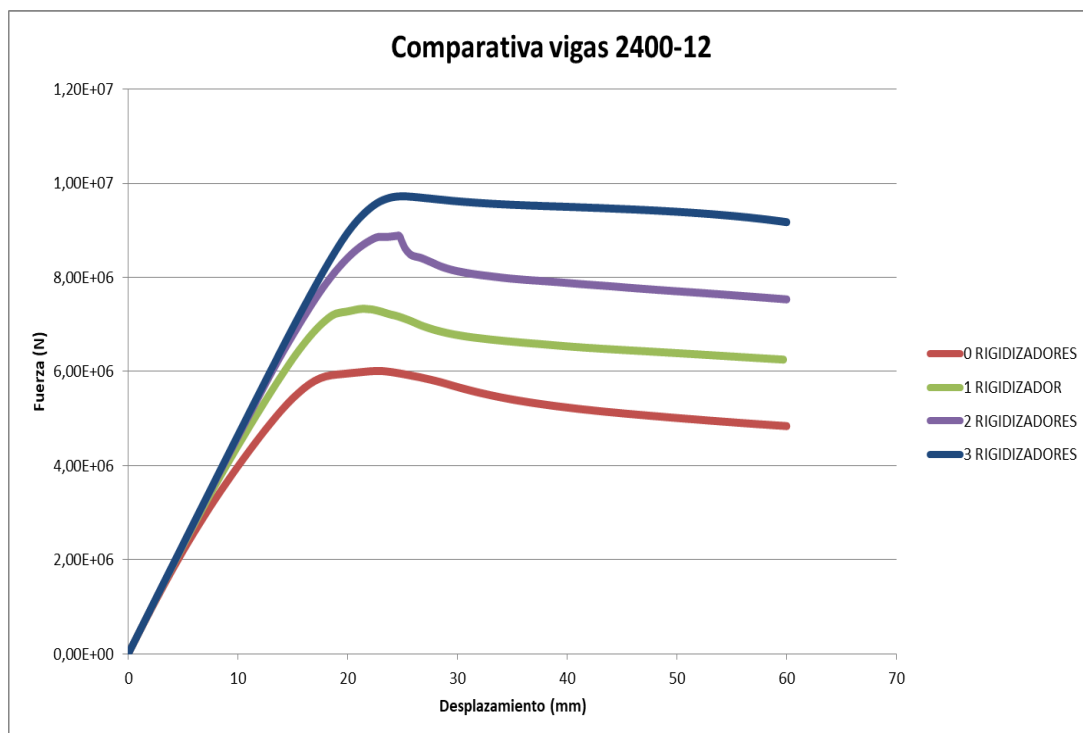


Figura 4.66. Comparativa vigas 2400-12 con diferente número de rigidizadores

En la Tabla 4.12 podemos comparar los diferentes valores de la rigidez obtenidos correspondientes a un desplazamiento de 10 mm. Dicha tabla facilita la visualización de todos los aspectos comentados con anterioridad.

$\delta = 10 \text{ mm}$	0 rig	1 rig	2 rig	3 rig
1600-6	122	142	156	166
1600-9	189	205	212	214
1600-12	240	245	246	247
2400-6	167	220	253	274
2400-9	282	338	370	389
2400-12	399	442	461	465

Tabla 4.12. Tabla comparativa valores de la rigidez para $\delta = 10 \text{ mm}$

En definitiva, la acción que más cambios produce en la forma de las diferentes curvas Fuerza-Desplazamiento es la variación del espesor. Al incrementar el espesor se constituye un sistema con mayor rigidez, mayor resistencia y mayor linealidad en la zona elástica, conllevando por tanto, al mismo tiempo, una pérdida de ductilidad.

4.5 Estudio de la resistencia última

En este último apartado se recogen los valores correspondientes a la resistencia máxima obtenidos en las vigas de alma plana durante el análisis.

4.5.1 Alma plana sin rigidizadores

Las Tablas 4.13 y 4.14 muestran los valores de la carga máxima para vigas de alma plana con 0 rigidizadores.

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Carga máxima (KN)
1600-6	1709,0
1600-9	3219,3
1600-12	5124,4

Tabla 4.13. Carga máxima vigas de alma plana, 0 rigidizadores y h=1600

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Carga máxima (KN)
2400-6	2318,5
2400-9	3911,2
2400-12	6012,7

Tabla 4.14. Carga máxima vigas de alma plana, 0 rigidizadores y h=2400

4.5.2 Alma plana con 1 rigidizador

Las Tablas 4.15 y 4.16 muestran los valores de la carga máxima para vigas de alma plana con 1 rigidizador.

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Carga máxima (KN)
1600-6	2569,6
1600-9	3728,4
1600-12	5494,7

Tabla 4.15. Carga máxima vigas de alma plana, 1 rigidizador y h=1600

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Carga máxima (KN)
2400-6	3405,7
2400-9	4962,5
2400-12	7332,2

Tabla 4.16. Carga máxima vigas de alma plana, 1 rigidizador y h=2400

4.5.3 Alma plana con 2 rigidizadores

Las Tablas 4.17 y 4.18 muestran los valores de la carga máxima para vigas de alma plana con 2 rigidizadores.

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Carga máxima (KN)
1600-6	3308,3
1600-9	4540,3
1600-12	6206,2

Tabla 4.17. Carga máxima vigas de alma plana, 2 rigidizadores y h=1600

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Carga máxima (KN)
2400-6	4087,4
2400-9	5863,1
2400-12	8884

Tabla 4.18. Carga máxima vigas de alma plana, 2 rigidizadores y h=2400

4.5.4 Alma plana con 3 rigidizadores

Las Tablas 4.19 y 4.20 muestran los valores de la carga máxima para vigas de alma plana con 3 rigidizadores.

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Carga máxima (KN)
1600-6	3731,1
1600-9	5056,6
1600-12	6553,5

Tabla 4.19. Carga máxima vigas de alma plana, 3 rigidizadores y h=1600

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	Carga máxima (KN)
2400-6	4597,2
2400-9	6621,2
2400-12	9725,4

Tabla 4.20. Carga máxima vigas de alma plana, 3 rigidizadores y h=2400

Como cabía esperar, y a vista de los gráficos y de las tablas anteriores, la carga última soportada por las vigas aumenta al aumentar el espesor del alma. Sucede lo mismo si incrementamos la altura del alma o el número de rigidizadores.

A continuación vamos a analizar con más detalle este último aspecto, y es que, el aumento del número de rigidizadores no tiene el mismo efecto sobre la carga última en todas las vigas.

En la Tabla 4.21 se recoge el incremento porcentual que experimenta la carga última (ΔF_u) al pasar de 0 a 3 rigidizadores intermedios para una altura y espesor del alma prefijados.

$$\Delta F_u(\%) = \frac{F_u(3 \text{ rig}) - F_u(0 \text{ rig})}{F_u(0 \text{ rig})} \quad (4.2)$$

Tipo viga	$\Delta F_u(\%)$	Tipo viga	$\Delta F_u(\%)$
1600-6	118,3 %	2400-6	98,3 %
1600-9	57,1 %	2400-9	69,3 %
1600-12	27,9 %	2400-12	61,7 %

Tabla 4.21. Incremento porcentual de la carga máxima a pasar de 0 a 3 rigidizadores

Podemos comprobar como para vigas con espesores del alma pequeños ($t_w = 6 \text{ mm}$) el hecho de pasar de 0 a 3 rigidizadores puede llevar incluso a duplicar la carga máxima soportada por las mismas, pues encontramos incrementos del orden del 100 %. Sin embargo, para aquellas vigas con espesores del alma elevados, que son capaces de alcanzar, aun careciendo de rigidizadores intermedios, grandes valores de resistencia última, el efecto de incrementar el número de rigidizadores no es tan significativo.

Finalmente, es importante recordar que para pequeños espesores del alma, la carga máxima es alcanzada con desplazamientos elevados pues las vigas presentan un comportamiento dúctil. Por el contrario, cuando el espesor aumenta de tamaño los desplazamientos hasta colapso disminuyen significativamente, la viga adquiere un comportamiento más frágil con una reducción de la zona plástica.

Capítulo 5. Estudio comparativo.

5.1 Vigas de alma plana y vigas de alma corrugada

Procederemos ahora a realizar una comparación entre los resultados obtenidos con el programa ANSYS para vigas de alma plana y para vigas de alma corrugada.

En primer lugar comenzaremos con aquellas vigas con altura del alma igual a 1600 mm. En las Figuras 5.1 a 5.3 mostradas a continuación se recogen las curvas Fuerza-Desplazamiento correspondientes a las vigas de alma corrugada y a las vigas de alma plana con 0, 1, 2 y 3 rigidizadores. Las curvas se encuentran separadas en tres gráficos en función del espesor del alma.

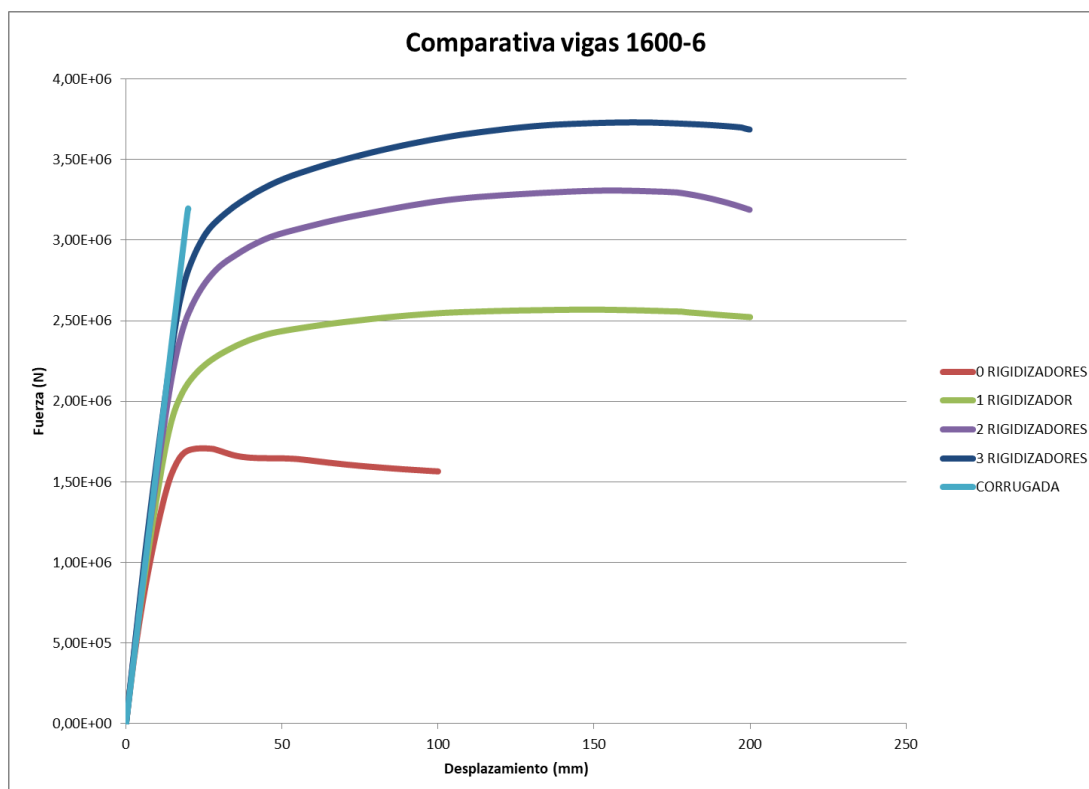


Figura 5.1. Comparativa vigas alma plana y corrugada 1600-6

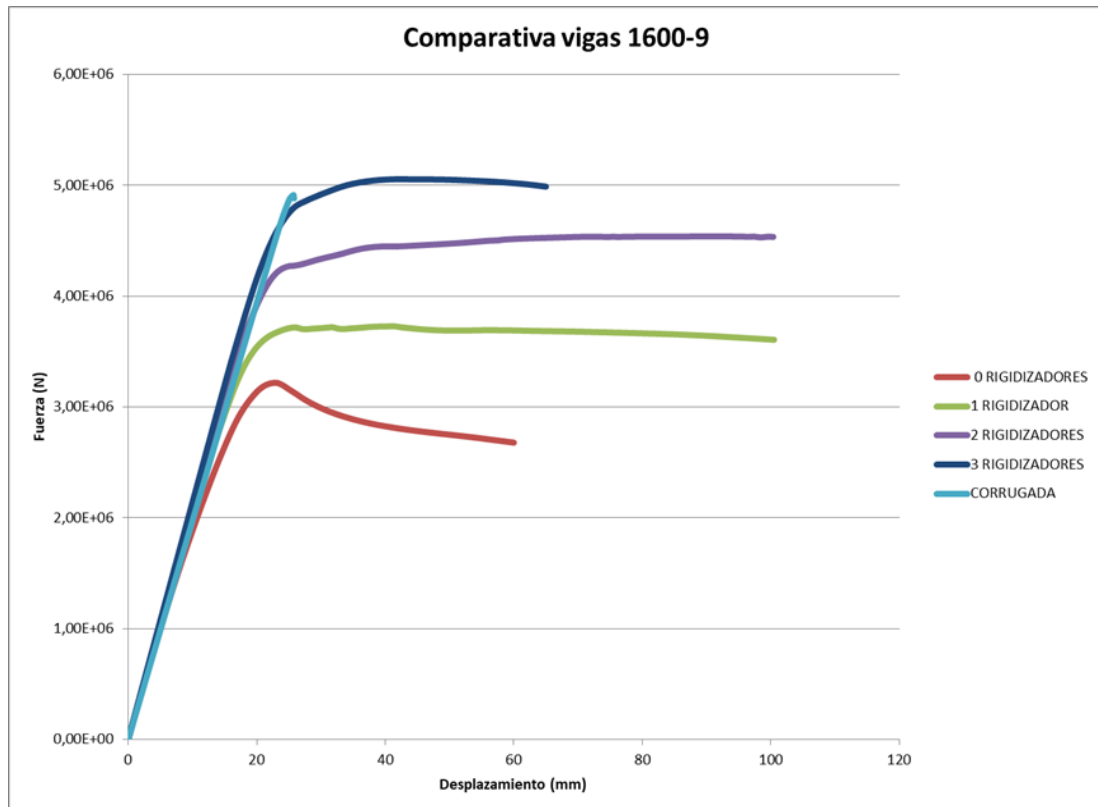


Figura 5.2. Comparativa vigas alma plana y corrugada 1600-9

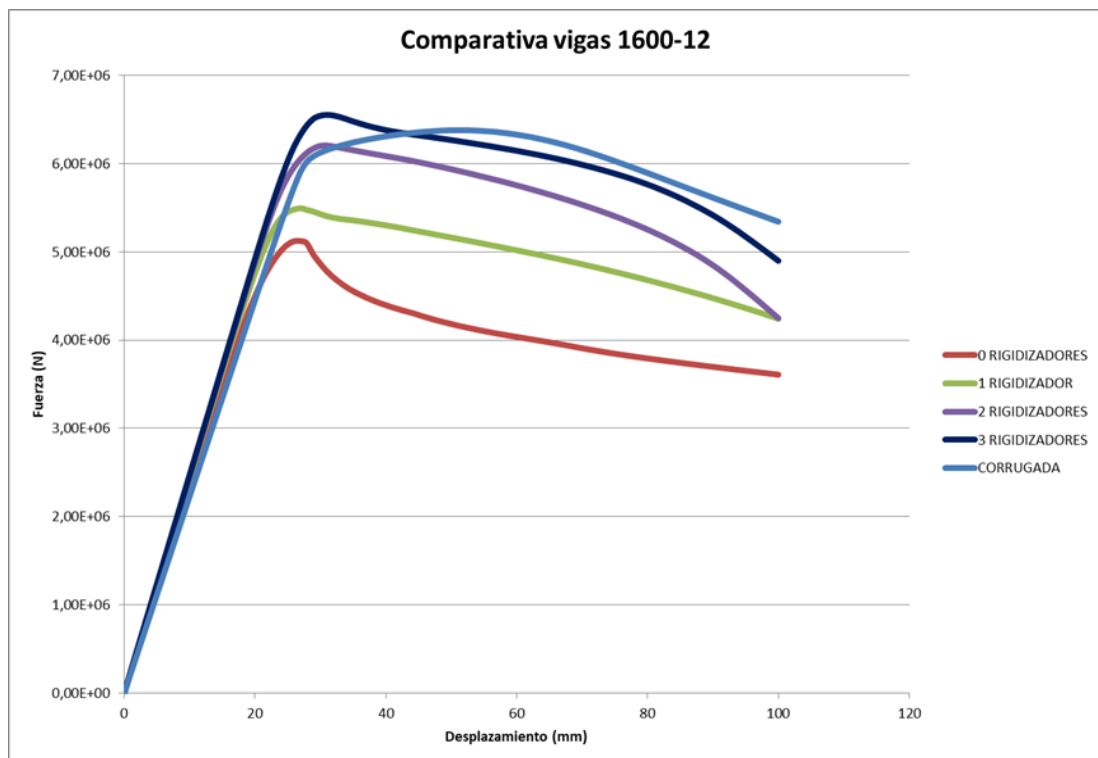


Figura 5.3. Comparativa vigas alma plana y corrugada 1600-12

Como podemos observar, la resistencia última de las vigas de alma corrugada es superior a la de las vigas de alma plana sin rigidizadores. Para el caso de espesor $t_w = 6 \text{ mm}$ el valor de la carga máxima sustentada por la corrugada llega casi a duplicar el valor soportado por la viga de alma plana sin rigidizadores.

No obstante, si aumentamos hasta 3 el número de rigidizadores intermedios en vigas de alma plana, el valor de la carga máxima resistida supera al de la corrugada. Esta diferencia se va atenuando medida que aumenta el espesor del alma. En la Tabla 5.1 podemos ver un resumen de los valores de la carga máxima obtenidos para vigas de alma plana con 0 y 3 rigidizadores intermedios y su comparación con los valores obtenidos en vigas de alma corrugada.

Tipo viga	$F_u \text{ (KN)}$ Corrugada	$F_u \text{ (KN)}$ 0 rig	$\Delta F_u \text{ (%)}$ C- 0 rig	$F_u \text{ (KN)}$ 3 rig	$\Delta F_u \text{ (%)}$ C- 3 rig
1600-6	3197,5	1709	46,6	3731,1	-16,7
1600-9	4913,2	3219,3	34,5	5056,6	- 2,9
1600-12	6379,7	5124,4	19,7	6553,5	-2,7

Tabla 5.1. Comparativa cargas máximas vigas alma corrugada , 0 y 3 rigidizadores, $h_w = 1600 \text{ mm}$

En cuanto a la rigidez, cabe destacar que las vigas de alma plana con tres rigidizadores presentan una rigidez mayor que las corrugadas, siendo especialmente significativa esta diferencia cuando aumentamos el espesor del alma ($t_w = 12 \text{ mm}$). En la Tabla 5.2 se realiza una comparativa entre las rigideces correspondientes a un desplazamiento de 10 mm para vigas corrugadas y vigas de alma plana con 3 rigidizadores.

Tipo viga	Rigidez corrugada (KN/mm)	Rigidez 3 rig (KN/mm)	$\Delta R \text{ (%)}$
1600-6	162	166	2,5
1600-9	197	214	8,6
1600-12	223	247	10,8

Tabla 5.2. Comparativa rigideces vigas alma corrugada y 3 rigidizadores, $h_w = 1600 \text{ mm}$

A continuación pasaremos a analizar los resultados obtenidos en el análisis de vigas con altura del alma igual a 2400 mm. Las Figuras 5.4 a 5.6 muestran las curvas Fuerza-Desplazamiento para vigas de alma corrugada y vigas de alma plana con 0, 1, 2 y 3 rigidizadores intermedios agrupadas en función del espesor.

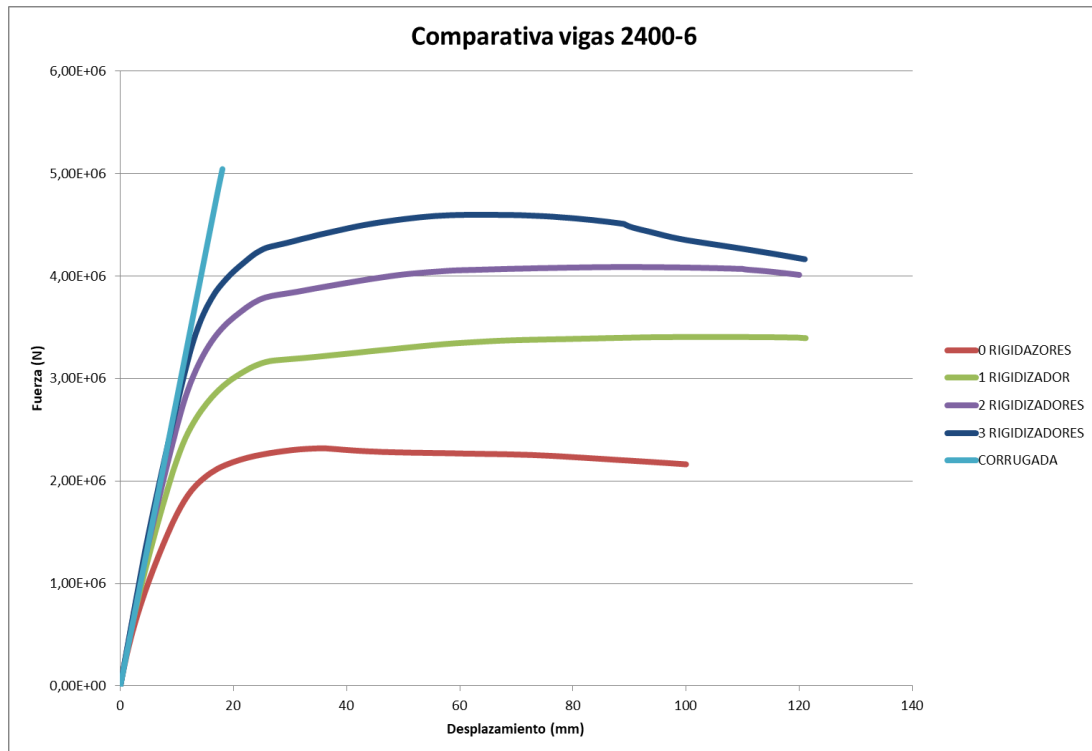


Figura 5.4. Comparativa vigas alma plana y corrugada 2400-6

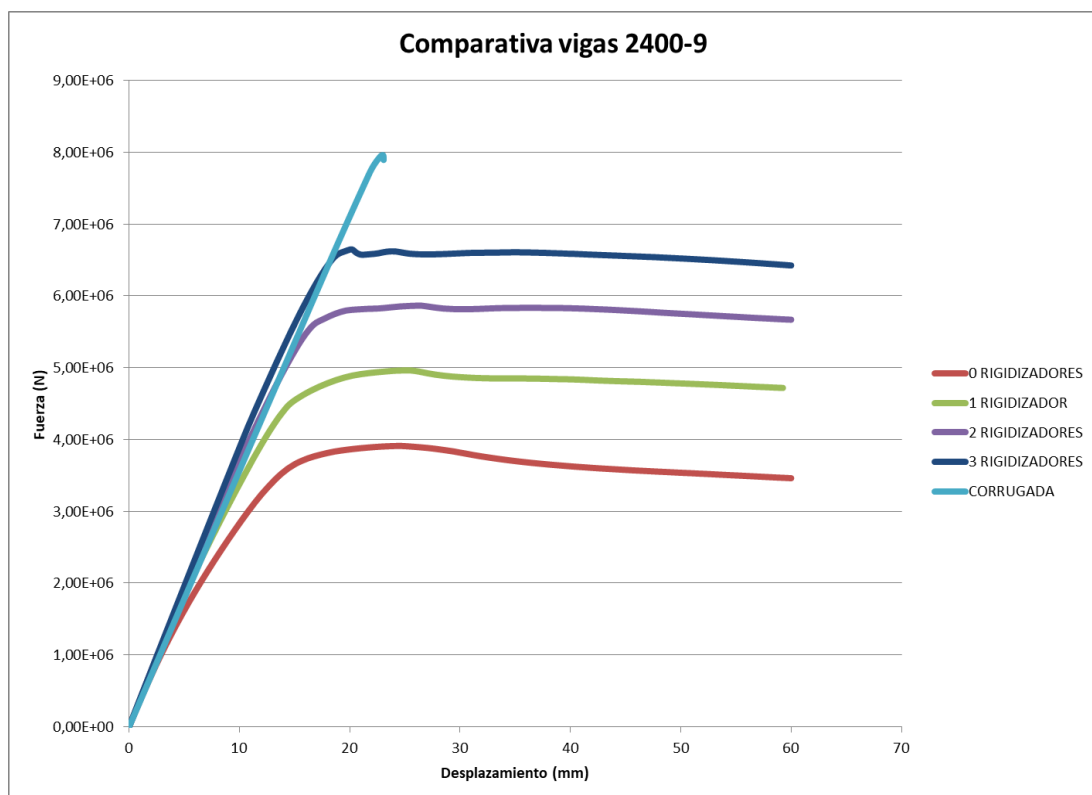


Figura 5.5. Comparativa vigas alma plana y corrugada 2400-9

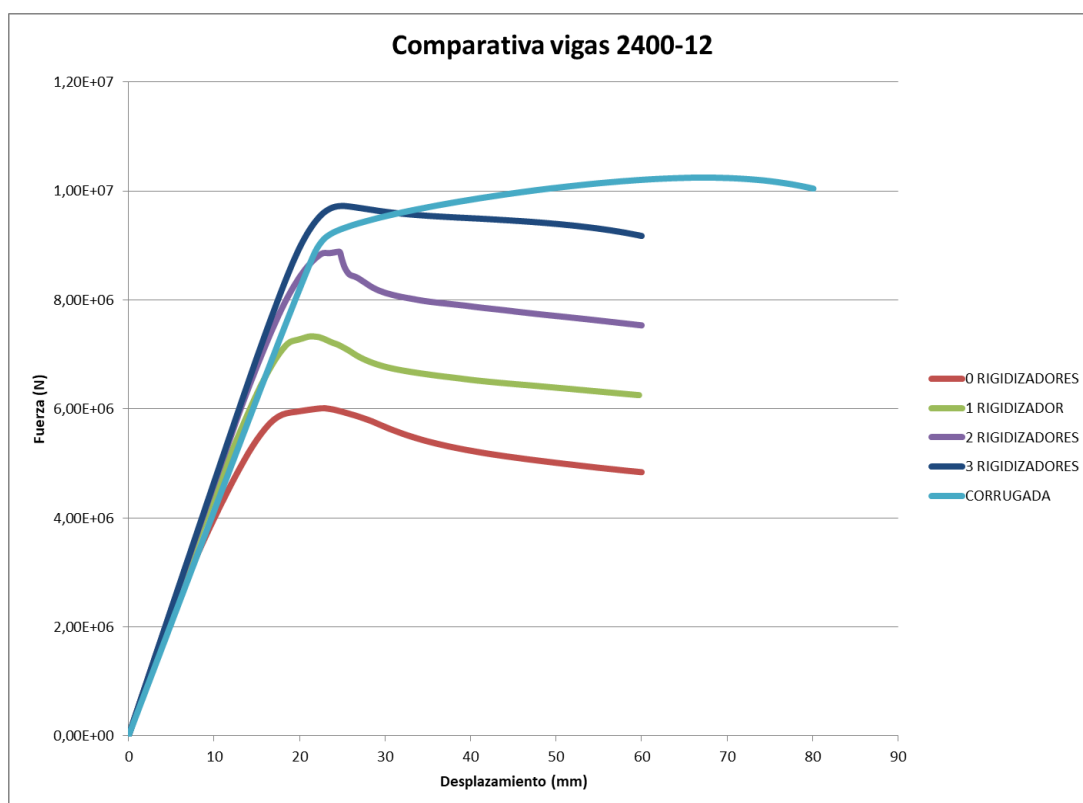


Figura 5.6. Comparativa vigas alma plana y corrugada 2400-12

Al igual que sucedía en el caso anterior la carga máxima soportada por las corrugadas es superior a la soportada por las vigas de alma plana sin rigidizadores. En este caso, la diferencia es incluso mayor que en el anterior, pues, como podemos observar, la carga resistida por las corrugadas duplica a la resistida por las de alma plana para los espesores 6 y 9 mm, y se queda próxima a ello en el caso de espesor 12 mm.

Por otro lado resulta relevante destacar que para 2400 mm de altura del alma aunque aumentemos a 3 el número de rigidizadores intermedios en vigas de alma plana, no logramos alcanzar el valor de la carga última resistida por las vigas de alma corrugada. A continuación, en la Tabla 5.3, podemos ver la comparativa entre la carga máxima resistida por las vigas de alma corrugada, 0 y 3 rigidizadores intermedios.

Tipo viga	F_u (KN) Corrugada	F_u (KN) 0 rig	ΔF_u (%) C- 0 rig	F_u (KN) 3 rig	ΔF_u (%) C- 3 rig
2400-6	5043,1	2318,5	54	4597,2	8,8
2400-9	7959,2	3911,2	50,9	6621,2	16,8
2400-12	10245,0	6012,7	41,3	9725,4	5,1

Tabla 5.3. Comparativa cargas máximas vigas alma corrugada , 0 y 3 rigidizadores, $h_w = 2400$ mm

Finalmente, respecto a la rigidez, y a diferencia de la carga última, esta es mayor en las vigas de alma plana con 3 rigidizadores intermedios que en las corrugadas. Al igual que sucedía con las vigas de $h_w = 1600 \text{ mm}$ esta diferencia es más evidente para espesores del alma elevados ($t_w = 12 \text{ mm}$).

Se recoge en la Tabla 5.4 una comparación entre las rigideces iniciales de las vigas de alma corrugada y de las vigas de alma plana con 3 rigidizadores donde podemos observar lo comentado anteriormente.

Tipo viga	Rigidez corrugada (KN/mm)	Rigidez 3 rig (KN/mm)	ΔR (%)
2400-6	281	306	8,9
2400-9	357	394	10,4
2400-12	413	468	13,3

Tabla 5.4. Comparativa rigideces vigas alma corrugada y 3 rigidizadores, $h_w = 2400 \text{ mm}$

A lo largo de este análisis fuimos recogiendo también los valores de la carga elástica de pandeo, es decir, los valores de la carga crítica teórica correspondiente al primer modo de pandeo. Llegados a este punto resulta interesante comparar dichos valores con la carga última real resistida tanto por las vigas de alma corrugada como por las de alma plana con diferente número de rigidizadores.

Comenzaremos con las vigas de alma plana. En este caso el valor de la carga elástica de pandeo es normalmente menor que el valor de la carga última real resistida por las vigas. Esta mayor resistencia se debe al desarrollo de la resistencia post-pandeo, es decir, aunque se haya producido el pandeo de la viga por el hecho de haberse superado la carga crítica, esta sigue acumulando carga debido al desarrollo de tensiones de membrana de tracción.

Si comparamos las diferencias existentes entre el valor de la carga elástica de pandeo y el valor de la carga última resistida vemos que la resistencia post-pandeo es mayor en aquellas vigas con pequeño espesor del alma. Este hecho explica que, aunque las vigas de alma plana presenten todas ellas un mecanismo de fallo fundamentalmente dúctil si las comparamos con las corrugadas, el desarrollo de dicha ductilidad es mucho más acusado en las vigas de espesor igual a 6 mm.

En definitiva, podemos concluir diciendo que el desarrollo de resistencia post-pandeo aporta ductilidad a las vigas evitando el colapso frágil de la estructura.

En las Tablas 5.5 a 5.8 podemos observar las diferencias existentes entre la carga elástica de pandeo y la carga última real.

0 rigidizadores	Carga elástica pandeo (KN)	Carga última resistida (KN)	ΔF (%)
1600-6	495,2	1709	245
1600-9	1641	3219,3	96,2
1600-12	3798	5124,4	34,9
2400-6	340	2318,5	581,9
2400-9	1119,3	3911,2	249,4
2400-12	2572,1	6012,7	133,8

Tabla 5.5. Comparativa carga elástica de pandeo y carga última vigas alma plana 0 rig

1 rigidizador	Carga elástica pandeo (KN)	Carga última resistida (KN)	ΔF (%)
1600-6	589,4	2569,6	336
1600-9	1927,6	3728,4	93,4
1600-12	4393,7	5494,7	25,1
2400-6	477,8	3405,7	612,7
2400-9	1571,4	4962,5	215,8
2400-12	3577,5	7332,2	104,9

Tabla 5.6. Comparativa carga elástica de pandeo y carga última vigas alma plana 1 rig

2 rigidizadores	Carga elástica pandeo (KN)	Carga última resistida (KN)	ΔF (%)
1600-6	753	3308,3	339,4
1600-9	2418,4	4540,3	87,7
1600-12	5415,7	6206,2	14,6
2400-6	795,9	4087,4	413,6
2400-9	2447,4	5863,1	139,6
2400-12	5294,9	8884	67,8

Tabla 5.7. Comparativa carga elástica de pandeo y carga última vigas alma plana 2 rig

3 rigidizadores	Carga elástica pandeo (KN)	Carga última resistida (KN)	ΔF (%)
1600-6	1059,7	3731,1	252,1
1600-9	3262,8	5056,6	55
1600-12	7051,2	6553,5	-7
2400-6	1214,1	4597,2	278,7
2400-9	3554,2	6621,2	86,3
2400-12	7388,9	9725,4	31,6

Tabla 5.8. Comparativa carga elástica de pandeo y carga última vigas alma plana 3 rig

En lo que respecta a las vigas de alma corrugada, en este caso, y a diferencia de las vigas de alma plana, la carga última resistida es menor que la carga elástica de pandeo. Es decir, las vigas colapsan antes de alcanzar la carga crítica teórica correspondiente al primer modo de pandeo.

Esta circunstancia explica que el mecanismo de fallo que se da en las vigas de alma corrugada es el colapso frágil por formación de un pliegue repentino. No se desarrolla la resistencia post-pandeo que proporciona a las vigas de alma plana cierta ductilidad.

Resulta también conveniente recordar que todo lo expuesto anteriormente presenta una excepción en el caso de vigas de alma corrugada y espesor del alma igual a 12 mm pues en este caso la ductilidad desarrollada se debe a la influencia de las alas y no al desarrollo de resistencia post-pandeo.

A continuación, en la Tabla 5.9, se muestran los valores correspondientes a la carga elástica de pandeo y a la carga última resistida en vigas de alma corrugada.

Corrugada	Carga elástica pandeo (KN)	Carga última resistida (KN)
1600-6	12079	3197,5
1600-9	29378	4913,2
1600-12	49860	6379,7
2400-6	15372	5043,1
2400-9	36536	7959,2
2400-12	66688	10245

Tabla 5.9. Comparativa carga elástica de pandeo y carga última vigas corrugadas

5.2 Vigas de alma corrugada y Eurocódigo EN1993-1-5

Para el cálculo del Estado Límite Último según el Eurocódigo EN1993-1-5 debemos analizar tanto el momento de resistencia de las alas como la resistencia a cortante del alma.

5.2.1 Momento de resistencia de las alas

Según el Eurocódigo EN1993-1-5 la expresión para la obtención del momento de resistencia debido al flector resulta:

$$M_{y,Rd} = \frac{b_f \times t_f \times f_{yf,r}}{\gamma_{M0}} \times (h_w + t_f) \quad (5.1)$$

donde $f_{yf,r}$ es el valor del límite elástico reducido debido a los momentos transversales que en las vigas de alma corrugada se producen en las alas:

$$f_{yf,r} = f_{yf} \times f_T \quad (5.2)$$

El factor de reducción del límite elástico se obtiene de acuerdo con la siguiente expresión:

$$f_T = 1 - 0,4 \times \sqrt{\frac{\sigma_x(M_z)}{\frac{f_{yf}}{\gamma_{M0}}}} \quad (5.3)$$

Es necesario, por tanto, calcular el valor de la tensión ocasionada por el momento transversal en las alas, así como el valor del propio momento.

Denominamos F a la fuerza generada en el contacto entre las alas y los bordes inferior y superior de cada uno de los paneles que componen el alma corrugada. Dicha fuerza depende del cortante (V) al que está sometida nuestra viga. La expresión de F resultó ser:

$$F = V \times \frac{a_1}{h_w} \quad (5.4)$$

En la Figura 5.7 podemos ver la disposición de las fuerzas F previamente comentadas. Esta distribución debe tenerse en cuenta para el cálculo del momento transversal.

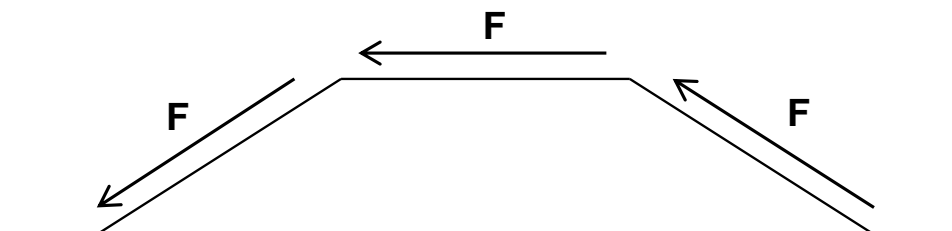


Figura 5.7. Disposición de las fuerzas F debidas al cortante en vigas de alma corrugada

La expresión del momento transversal queda, por tanto, de la siguiente manera:

$$M_z = F \times \frac{a_3}{2} + F \times \frac{a_3}{a_2} \times (a_1 + a_4) \quad (5.5)$$

Dicho momento da lugar, considerando una distribución uniforme, a una tensión en las alas igual a:

$$\sigma_x(M_z) = \frac{4 \times M_z}{t_f \times b_f^2} \quad (5.6)$$

En la Figura 5.8 se puede observar la distribución de tensiones a lo largo de las alas de la viga.

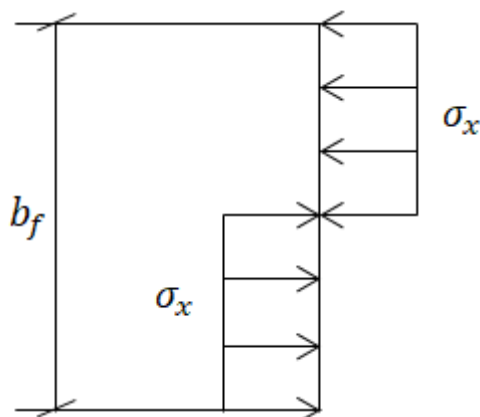


Figura 5.8. Distribución de tensiones en las alas de la viga

Todo lo expuesto anteriormente va encaminado a la obtención del momento de resistencia longitudinal de las alas debido al flector, sin embargo, de cara a facilitar la comparación de los resultados obtenidos con los suministrados por el programa ANSYS, resulta conveniente relacionar dicho momento con la fuerza vertical (P) que aplicada en el centro luz de la viga lo genera.

La relación entre $M_{y,Rd}$ y P resultó ser la siguiente:

$$P = \frac{M_{y,Rd} \times 4}{L} \quad (5.7)$$

siendo $L = 4800 \times 2 = 9600 \text{ mm}$ la distancia entre los dos rigidizadores laterales.

A continuación, en la Tabla 5.10, se recogen los valores de P calculados para los diferentes tipos de vigas.

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	$P_{flector}$ (KN)
1600-6	5039,3
1600-9	5039,3
1600-12	5039,3
2400-6	7489,9
2400-9	7489,9
2400-12	7489,9

Tabla 5.10. Carga máxima soportada por las alas según Eurocódigo EN1993-1-5

5.2.2 Resistencia del alma a cortante

Para el cálculo de la resistencia del alma a cortante el Eurocódigo EN1993-1-5 proporciona la siguiente expresión:

$$V_{bw,Rd} = \chi_c \times \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1} \times \sqrt{3}} \times h_w \times t_w \quad (5.8)$$

donde χ_c es el menor de los factores de reducción obtenidos para pandeo local, $\chi_{c,l}$, o para pandeo global, $\chi_{c,g}$.

El factor de reducción para pandeo local, $\chi_{c,l}$, debe calcularse a partir de las siguientes expresiones:

$$\chi_{c,l} = \frac{1,15}{0,9 + \overline{\lambda}_{c,l}} \leq 1,0 \quad (5.9)$$

donde

$$\overline{\lambda}_{c,l} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,l} \times \sqrt{3}}} \quad (5.10)$$

y

$$\tau_{cr,l} = 4,83 \times E \times \left[\frac{t_w}{a_1} \right]^2 \quad (5.11)$$

Por otro lado, el factor de reducción para pandeo global debe obtenerse como:

$$\chi_{c,g} = \frac{1,5}{0,5 + \overline{\lambda}_{c,g}^2} \leq 1,0 \quad (5.12)$$

donde

$$\overline{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,g} \times \sqrt{3}}} \quad (5.13)$$

y

$$\tau_{cr,g} = \frac{32,4}{t_w \times h_w^2} \times \sqrt[4]{D_x \times D_z^3} \quad (5.14)$$

El Eurocódigo EN1993-1-5 recoge las expresiones necesarias para el cálculo de D_x y D_z , pero no recoge la expresión necesaria para el cálculo de I_z , definido como el segundo momento del área de una sección corrugada de longitud w . No obstante, Johansson et al. [23], en sus comentarios del Eurocódigo EN1993-1-5, sugieren el uso de las siguientes expresiones:

$$D_x = \frac{E \times t_w^3}{12 \times (1 - \nu^2)} \times \frac{w}{s} = \frac{E \times t_w^3}{12 \times (1 - \nu^2)} \times \frac{a_1 + a_4}{a_1 + a_2} \quad (5.15)$$

$$D_z = \frac{E \times I_z}{w} = \frac{E \times t_w \times a_3^2}{12} \times \frac{3 \times a_1 + a_2}{a_1 + a_4} \quad (5.16)$$

Al igual que hicimos con el momento de resistencia de las alas, resulta necesario calcular, a partir del $V_{bw,Rd}$ obtenido, el valor de la carga P que aplicada en el centro luz de la viga es capaz de soportar el alma.

La relación entre $V_{bw,Rd}$ y P es:

$$V_{bw,Rd} = \frac{P}{2} \quad (5.17)$$

Se muestran en la Tabla 5.11 los valores de P obtenidos para las diferentes tipologías de vigas.

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	$P_{cortante}$ (KN)
1600-6	2709,9
1600-9	4803,0
1600-12	7043,6
2400-6	4064,9
2400-9	7204,6
2400-12	10565,4

Tabla 5.11. Carga máxima soportada por el alma según Eurocódigo EN1993-1-5

En el Anejo A pueden observarse con mayor detalle los cálculos intermedios realizados tanto para la obtención del momento de resistencia de las alas como para la obtención de la resistencia del alma a cortante.

La carga de resistencia última, P , según el Eurocódigo EN1993-1-5 debe elegirse como la menor de las dos cargas previamente calculadas.

A continuación, en la Tabla 5.12, se recoge una síntesis de los resultados obtenidos, el valor de la carga P mínima, así como la comparación de las mismas con los resultados proporcionados por el programa ANSYS.

Dimensiones viga ($h_w - t_w$)	$P_{flector}$ (KN)	$P_{cortante}$ (KN)	$P_{mínima}$ (KN)	Carga última ANSYS	Diferencia (%)
1600-6	5039,3	2709,9	2709,9	3197,5	15,25
1600-9	5039,3	4803,0	4803,0	4913,2	2,24
1600-12	5039,3	7043,6	5039,3	6379,7	21,01
2400-6	7489,9	4064,9	4064,9	5043,1	19,40
2400-9	7489,9	7204,6	7204,6	7959,2	9,48
2400-12	7489,9	10565,4	7489,9	10245,0	26,89

Tabla 5.12. Comparativa cargas últimas Eurocódigo EN1993-1-5 y ANSYS

Como observamos, el valor de la P_{min} , obtenida como la menor de las dos cargas $P_{flector}$ y $P_{cortante}$, nos indica el modo de fallo que según el Eurocódigo EN1993-1-5 se producirá. De esta manera, podemos predecir

que el mecanismo de fallo de las vigas 1600-6, 1600-9, 2400-6 y 2400-9 será por cortante del alma mientras que el de las vigas 1600-12 y 2400-12 será por agotamiento de las alas a flexión.

Se puede afirmar, por tanto, que el modo de fallo previsto por el Eurocódigo EN1993-1-5 para los diferentes tipos de vigas coincide con el modo de fallo observado durante el análisis realizado con el programa ANSYS.

Por otro lado vemos que los valores de las cargas últimas calculadas según el Eurocódigo EN1993-1-5 son menores que los valores obtenidos en el análisis. Las vigas resisten en todos los casos más que lo que indica el cálculo teórico. Esto es debido fundamentalmente a que se está produciendo una interacción entre las alas y el alma. Cuando según el Eurocódigo EN1993-1-5 tomamos como P_{min} la $P_{cortante}$ estamos considerando que todo el cortante es resistido exclusivamente por el alma, cuando en realidad, aunque de forma mínima, las alas realizan también una pequeña aportación al mismo. Lo mismo sucede en el caso contrario, cuando la P_{min} se corresponde con la $P_{flector}$. Aquí estamos considerando que todo el flector es resistido de forma única por las alas cuando realmente el alma también contribuye, aunque, eso sí, dicha contribución suele considerarse despreciable en la amplia mayoría de los casos.

Finalmente hay que indicar que las diferencias entre los valores del Eurocódigo EN1993-1-5 y el análisis son ligeramente mayores en los casos de altura del alma igual a 2400 mm. Esto se debe principalmente a que los valores de las resistencias tanto de las alas como del alma son mayores que para $h_w = 1600\text{ mm}$, por tanto, los valores de las resistencias despreciadas serán igualmente superiores.

Capítulo 6. Conclusiones.

A lo largo de este documento hemos ido exponiendo los resultados obtenidos en el análisis por elementos finitos realizado por el programa ANSYS, por un lado, de vigas de alma corrugada con espesores del alma 6, 9 y 12 mm y altura igual a 1600 y 2400 mm; y por otro, de vigas de alma plana con 0, 1, 2 y 3 rigidizadores y las mismas combinaciones de espesores y alturas del alma.

También, los valores de carga última obtenidos para vigas de alma corrugada fueron comparados con los valores calculados según la formulación que figura en el Eurocódigo EN1993-1-5.

Aunque la mayoría de conclusiones ya han sido presentadas a lo largo del documento, trataremos de realizar en el presente capítulo una recopilación de éstas agrupadas en cuatro subcapítulos, uno relativo a conclusiones fruto del estudio de vigas de alma corrugada, otro relativo a las vigas de alma plana, otro con las conclusiones relativas a la comparación de las dos tipologías de vigas y, finalmente, un último subcapítulo con los aspectos más importantes de la comparación de las vigas de alma corrugada con los valores aportados por el Eurocódigo EN1993-1-5.

6.1 Conclusiones relativas a vigas de alma corrugada

- Para los espesores analizados de 6 y 9 mm las vigas presentan un comportamiento elástico lineal hasta rotura, la cual tiene lugar de forma repentina mediante la formación de un pliegue en el alma. Estamos ante un colapso frágil con fallo del alma a cortante.
- Por el contrario, las vigas de alma corrugada y espesor 12 mm presentan un comportamiento elástico lineal en el tramo inicial, pero, alcanzado cierto punto, comienzan a deformarse plásticamente. Se produce la plastificación de las alas: estamos ante un fallo de las alas a flexión con independencia del alma.
- Tanto los valores de la rigidez como de la carga máxima sustentada aumentan a medida que lo hace el espesor del alma y la altura de la viga.
- La rigidez se mantiene constante en todo el tramo elástico, abarcando este prácticamente la totalidad del comportamiento hasta rotura en el caso de vigas de alma corrugada con espesores 6 y 9 mm, ya que carecen de zona plástica.
- Debido al fenómeno de la plastificación, la carga máxima se alcanza para valores superiores del desplazamiento cuando el espesor del alma es igual a 12 mm. En este caso los valores obtenidos están en torno a

50-70 mm mientras que para espesores del alma de 6 y 9 mm los desplazamientos bajo carga máxima giran en torno a 20 mm.

6.2 Conclusiones relativas a vigas de alma plana

- Las curvas Fuerza-Desplazamiento presentan una evolución en función del espesor del alma, con independencia de la altura del mismo y del número de rigidizadores.
- Para espesores del alma pequeños ($t_w = 6 \text{ mm}$) las vigas presentan un comportamiento dúctil. La rigidez decrece a medida que aumenta la carga y la carga última se alcanza para valores elevados del desplazamiento. Para el caso de $t_w = 6 \text{ mm}$, $h_w = 1600 \text{ mm}$ y 3 rigidizadores intermedios se alcanza el valor extremo de 163,69 mm de desplazamiento bajo carga máxima.
- Por el contrario, a medida que incrementamos el espesor del alma, las vigas ganan linealidad en la zona elástica. Nos encontramos ante un sistema más rígido y más resistente, pero sin embargo, más frágil. Los desplazamientos de las vigas analizadas, con $t_w = 12 \text{ mm}$, bajo carga última se encuentran en torno a 20-30 mm.
- En cuanto al valor absoluto de la rigidez, este aumenta de forma significativa a medida que lo hace el espesor y la altura del alma. Sin embargo, al aumentar el número de rigidizadores intermedios, el incremento de la rigidez inicial es mucho más moderado, especialmente cuando $h_w = 1600 \text{ mm}$. Para el caso de $h_w = 1600 \text{ mm}$ y $t_w = 12 \text{ mm}$, al pasar de 0 a 3 rigidizadores intermedios, la rigidez en el tramo inicial tan solo se incrementa desde 240 KN/mm hasta 247 KN/mm, es decir, un aumento mínimo del 2,9 %.
- Respecto a la carga última, ésta aumenta si incrementamos el espesor del alma, la altura de la viga o el número de rigidizadores intermedios. No obstante, el aumento del número de rigidizadores intermedios no tiene el mismo efecto en todas las vigas siendo más acusado en vigas de pequeño espesor ($t_w = 6 \text{ mm}$) donde la carga última soportada puede llegar a duplicarse al pasar de 0 a 3 rigidizadores.

6.3 Conclusiones relativas a la comparación entre vigas de alma corrugada y vigas de alma plana

- La resistencia última de las vigas de alma corrugada es superior a la de las vigas de alma plana sin rigidizadores. La carga máxima resistida por las corrugadas es aproximadamente el doble en todos los casos estudiados de altura del alma igual a 2400 mm y en el caso de altura del alma igual a 1600 mm y espesor 6 mm. El mayor incremento se produce para el caso de $h_w = 2400 \text{ mm}$ y espesor 6 mm donde pasamos de una

carga máxima de 2318,5 KN sustentada por la viga de alma plana a los 5043,1 KN que soporta la corrugada: un aumento del 117,5 %.

- Si aumentamos hasta 3 el número de rigidizadores intermedios en las vigas de alma plana, lograremos resistir una carga última mayor que la resistida por las corrugadas para vigas con altura del alma igual a 1600 mm. Sin embargo, en el caso de vigas de $h_w = 2400 \text{ mm}$, la carga última resistida por las vigas de alma plana y 3 rigidizadores es siempre inferior a la resistida por las corrugadas.
- La rigidez de las vigas de alma plana y 3 rigidizadores es siempre superior a la de las corrugadas en el tramo inicial. No obstante, vemos que para las dos alturas del alma analizadas, 1600 mm y 2400 mm, esta diferencia se acentúa aún más cuando tenemos espesores del alma elevados ($t_w = 12 \text{ mm}$) donde la rigidez de las vigas de alma plana y 3 rigidizadores intermedios llega a ser en torno a un 10-13 % superior a la de las corrugadas.
- En las vigas de alma plana el valor de la carga elástica de pandeo es normalmente menor que la carga última real resistida por las vigas. Esto es debido al desarrollo de resistencia post-pandeo, la cual es aún mayor en vigas con espesores del alma reducidos ($t_w = 6 \text{ mm}$). El desarrollo de esta resistencia post-pandeo aporta ductilidad a las vigas, evitando el colapso frágil. De las vigas analizadas, la mayor diferencia entre la carga elástica de pandeo y la carga última real resistida se encuentra en el caso de $t_w = 6 \text{ mm}$, $h_w = 2400 \text{ mm}$ y 1 rigidizador intermedio donde encontramos una carga elástica de pandeo de 477,8 KN y una carga última real resistida de 3405,7 KN, es decir, la resistencia real es un 612,7 % superior a la carga crítica teórica.
- Por otro lado, en las vigas de alma corrugada la carga real sustentada es menor que la carga elástica de pandeo. Este hecho explica el colapso frágil que en ellas se produce, pues no cuentan con la ductilidad que proporciona el desarrollo de la resistencia post-pandeo.

6.4 Conclusiones relativas a la comparación de los resultados obtenidos en el análisis por E.F. de vigas de alma corrugada y el Eurocódigo EN1993-1-5

Finalmente, cabe recordar que se realizó una comparación entre los valores de carga última obtenidos en el análisis por elementos finitos y los valores calculados según la formulación del Eurocódigo EN1993-1-5 para las vigas de alma corrugada. Las conclusiones más relevantes a las que se llegó son las siguientes:

- El modo de fallo observado durante el análisis con el programa ANSYS resulta ser el mismo que el previsto por el Eurocódigo EN1993-1-5. Las

vigas 1600-6, 1600-9, 2400-6 y 2400-9 fallan por cortante del alma y las vigas 1600-12 y 2400-12 lo hacen por agotamiento de las alas a flexión.

- Los valores de las cargas últimas calculadas según el Eurocódigo EN1993-1-5 son menores que las obtenidas en el análisis por elementos finitos, debido, fundamentalmente, a que estamos suponiendo que todo el cortante es resistido única y exclusivamente por el alma y todo el flector por las alas, cuando en realidad, se produce una interacción entre ambas partes.
- La diferencia entre los valores del Eurocódigo EN1993-1-5 y los obtenidos con ANSYS son mayores para $h_w = 2400 \text{ mm}$ pues los valores de las resistencias despreciadas son superiores. Para $h_w = 1600 \text{ mm}$ encontramos diferencias que van desde un 2,24 % a un 21,01 %, mientras que para $h_w = 2400 \text{ mm}$ las diferencias se mueven entre un 9,48 % y un 26,89 %.

Anejo A. Cálculos realizados para la obtención del Estado Límite Último según el Eurocódigo EN1993-1-5 en vigas de alma corrugada.

En el presente anejo se exponen con detalle los cálculos intermedios que fue preciso realizar para la obtención tanto del momento de resistencia de las alas como de la resistencia a cortante del alma según el Eurocódigo EN1993-1-5 para vigas de alma corrugada.

A.1 Momento de resistencia de las alas

En primer lugar debemos comprobar si el área del ala sometido a compresión debe ser reducida. Para ello obtenemos el factor de reducción ρ calculando, previamente, una serie de valores intermedios:

El factor de pandeo, k_σ , debe tomarse como el máximo valor entre $k_\sigma = 0,60$ o $k_\sigma = 0,43 + \left(\frac{a}{b}\right)^2$ (A.1), siendo $a = a_1 + 2 \times a_4$ (A.2) y b la máxima anchura del ala entre la soldadura de unión con el alma y el borde libre.

Después, debemos calcular $\bar{\lambda}_p$ según la expresión:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \times \varepsilon \times \sqrt{k_\sigma}} \quad (\text{A.3})$$

donde \bar{b} es similar a la b ya definida y $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$ (A.4)

En la Tabla A.1 pueden verse los valores que tomaron los diferentes parámetros para todas las situaciones estudiadas. Podemos observar que $\rho = 1$ en todos los casos, pues $\bar{\lambda}_p \leq 0,748$:

$h_w - t_w$	a	b	k_σ	k_σ (max)	ε	$\bar{\lambda}_p$	ρ
1600-6	875	334,5	0,57614	0,6	0,813617	0,373777	1
1600-9	875	333	0,57483	0,6	0,813617	0,372101	1
1600-12	875	331,5	0,57353	0,6	0,813617	0,370425	1
2400-6	875	334,5	0,57614	0,6	0,813617	0,373777	1
2400-9	875	333	0,57483	0,6	0,813617	0,372101	1
2400-12	875	331,5	0,57353	0,6	0,813617	0,370425	1

Tabla A.1. Valores intermedios para el cálculo del área reducida

Para el cálculo de la $P_{flector}$ fue necesario llevar a cabo un proceso iterativo partiendo de un factor de reducción debido al momento transversal en las alas, f_T , igual a 1.

El proceso iterativo fue llevado a cabo calculando los diferentes parámetros según la secuencia que se muestra a continuación. Las fórmulas para la obtención de dichos parámetros aparecen recogidas en 5.2.1.

$$f_T = 1 \rightarrow f_{yf,r} = 355 \text{ MPa} \rightarrow M_{y,Rd} \rightarrow P_{flector} \rightarrow M_z \rightarrow \sigma_x(M_z) \rightarrow f_T \rightarrow \text{Repetir}$$

En las Tablas A.2 y A.3 podemos ver los valores obtenidos a lo largo de dicho proceso, por un lado para $h_w = 1600 \text{ mm}$, y por otro para $h_w = 2400 \text{ mm}$. Se observa al final de ambas tablas una convergencia en los valores, lo cual implica que hemos llegado al final de nuestra iteración.

M_z	$\sigma_x(M_z)$	f_T	$f_{yf,r}$	$M_{y,Rd}$	$P_{flector}$
		1	355	14643750000	6101562
254430389	81,4177	0,8084	286,9961	11838590234	4932745
205691651	65,8213	0,8277	293,8554	12121538842	5050641
210607791	67,3944	0,8257	293,1291	12091575724	5038156
210087192	67,2279	0,8259	293,2056	12094732024	5039471
210142031	67,2454	0,8259	293,1975	12094399357	5039333
210136251	67,2436	0,8259	293,1984	12094434417	5039347
210136861	67,2437	0,8259	293,1983	12094430722	5039346
210136796	67,2437	0,8259	293,1983	12094431111	5039346
210136803	67,2437	0,8259	293,1983	12094431070	5039346
210136802	67,2437	0,8259	293,1983	12094431074	5039346
210136802	67,2437	0,8259	293,1983	12094431074	5039346

Tabla A.2. Proceso iterativo para $h_w = 1600 \text{ mm}$

M_z	$\sigma_x(M_z)$	f_T	$f_{yf,r}$	$M_{y,Rd}$	$P_{flector}$
		1	355	21743750000	9059895
251860385	80,5953	0,8094	287,3404	17599602716	7333167
203858245	65,2346	0,8285	294,1285	18015376684	7506406
208674203	66,7757	0,8265	293,4137	17971594109	7488164
208167065	66,6134	0,8267	293,4886	17976180612	7490075
208220191	66,6304	0,8267	293,4808	17975699885	7489874
208214622	66,6286	0,8267	293,4816	17975750268	7489895
208215206	66,6288	0,8267	293,4815	17975744988	7489893
208215145	66,6288	0,8267	293,4815	17975745541	7489893
208215151	66,6288	0,8267	293,4815	17975745483	7489893
208215150	66,6288	0,8267	293,4815	17975745489	7489893
208215150	66,6288	0,8267	293,4815	17975745489	7489893

Tabla A.3. Proceso iterativo para $h_w = 2400 \text{ mm}$

A.2 Resistencia a cortante del alma

Por otro lado, para calcular la resistencia a cortante del alma fue preciso obtener primero los factores de reducción para pandeo local y para pandeo global.

En las Tablas A.4 y A.5 que aparecen a continuación se muestran los valores que fueron tomando los diferentes parámetros intermedios. Las fórmulas empleadas para obtener dichos parámetros aparecen recogidas en 5.2.2.

Podemos observar como el menor de los factores, y por tanto el empleado en el cálculo, es, para todas las vigas analizadas, el correspondiente al pandeo local.

$h_w - t_w$	$\tau_{cr,l}$	$\overline{\lambda}_{c,l}$	$\chi_{c,l}$
1600-6	345,7022	0,7699	0,6886
1600-9	777,8301	0,5133	0,8136
1600-12	1382,8090	0,3849	0,8949
2400-6	345,7022	0,7699	0,6886
2400-9	777,8301	0,5133	0,8136
2400-12	1382,8090	0,3849	0,8949

Tabla A.4. Valores intermedios para el cálculo del factor de reducción por pandeo local

$h_w - t_w$	D_x	D_z	$\tau_{cr,g}$	$\overline{\lambda}_{c,g}$	$\chi_{c,g}$	$\chi_{c,g}$
1600-6	3834319	6967187500	2250,9663	0,3017	2,5378	1
1600-9	12940828	10450781250	2756,8594	0,2726	2,6116	1
1600-12	30674556	13934375000	3183,3470	0,2537	2,6577	1
2400-6	3834319	6967187500	1000,4294	0,4526	2,1280	1
2400-9	12940828	10450781250	1225,2708	0,4089	2,2479	1
2400-12	30674556	13934375000	1414,8209	0,3806	2,3260	1

Tabla A.5. Valores intermedios para el cálculo del factor de reducción por pandeo global

Anejo B. Comunicación para el congreso “The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structure, SDSS, 2019, Prague, 11-13 September”

En el presente anejo se procede a reproducir la comunicación elaborada por A. González, L. Vallelado and M.A. Serna [24] para el congreso internacional: “The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structure”, que se celebrará en la ciudad de Praga del 11 al 13 de Septiembre de 2019.

La serie de coloquios que tendrán lugar en este evento tienen como finalidad presentar el progreso en la investigación teórica, numérica y experimental en el campo de la estabilidad y ductilidad de estructuras compuestas de acero y hormigón-acero.

De: SDSS 2019 Prague [mailto:sdss2019@conftool.com]

Enviado el: jueves, 09 de mayo de 2019 16:49

Para: Serna Oliveira, Miguel Angel <miguelangel.serna@unican.es>

CC: alejandro.gonzalez@unican.es; lazaro.vallelado@unican.es

Asunto: SDSS 2019: Final Version 272 Received

Dear Prof. Miguel Ángel Serna,

The final version of your contribution has been received.

Contribution Details

=====

Contribution ID : 272

Type : SUBMIT A CONTRIBUTION

Acceptance Status: This contribution has been accepted.

Title : A Comparative Analysis on the Stability and Ultimate Strength of Steel Plated Girders with Planar and Corrugated Webs

Author(s) : Gonzalez, Alejandro; Vallelado, Lazaro; Serna, Miguel Ángel

Presenting Author : Serna, Miguel Ángel

Presenter's E-Mail: miguelangel.serna@unican.es

Uploaded Files

=====

Final paper (PDF version) : Contribution_272_final.pdf

Last Upload : 9th May 2019, 04:48:42pm CEST

Final paper (Word version): Contribution_272_final_2.docx
Last Upload : 9th May 2019, 04:48:42pm CEST

Consent to Publish : Contribution_272_final_3.pdf
Last Upload : 9th May 2019, 04:48:42pm CEST

With best regards,
Your SDSS 2019 organisers.

--

The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures
Registration and paper submission: <https://www.conftool.com/sdss2019/>
Conference website: <http://sdss2019.cz/>



A comparative analysis on the stability and ultimate strength of steel plated girders with planar and corrugated webs

A. González, L. Valledado & M.A. Serna

Department of Structural and Mechanical Engineering, University of Cantabria, Spain

ABSTRACT: The paper presents a finite element study on buckling loads and ultimate strength of plated girders with trapezoidal corrugated webs and results are compared with those obtained for girders with planar webs, with or without stiffeners. The comparative analysis is focused on three main points: local buckling of the web due to shear forces; ultimate strength of the girder under shear forces and bending moments; and global stiffness and ductility behavior. Results show that the use of corrugated web significantly increases buckling loads and overall ultimate strength when compared with unstiffened planar web. However, these benefits are at the cost of reducing ductility. Moreover, similar structural properties to those obtained with corrugation may be attained using stiffened planar webs with a reduced number of stiffeners.

1 INTRODUCTION

The use of sinusoidal and trapezoidal corrugated steel plates as webs in welded girders has seen a growing research interest in the last two decades, as has been pointed out by Hasan et al (2017). From a structural engineering point of view, it seems clear that corrugation has the benefit of increasing local buckling loads. A numerical study on shear capacity of plate girders with trapezoidally corrugated webs was developed by Luo & Edlund (1996). In the same period, a comprehensive experimental study of trapezoidal corrugated web built-up girders was presented by Elgaaly et al. (1997) and Elgaaly & Seshadri (1998). More recently, Jáger et al. (2015, 2017a, 2017b and 2017c) have developed a complete experimental and theoretical research on the interaction of shear, bending and path loading. From a theoretical point of view, the stress state of I-section girders has been studied by Abbas et al. (2006, 2007a, 2007b), who have proposed a direct analytical method for their analysis. Leblouba et al. (2017a and 2017b) have presented a normalized shear strength formulation for trapezoidal corrugated webs. Centered on sinusoidal corrugation, Pasternak & Kubieniec (2010) have carried out an experimental research and have proposed new formulations for patch loading and lateral torsional buckling resistance.

In this context, the paper presents a study on the buckling loads and ultimate strength of plated girders with trapezoidal corrugated webs and results are compared with those obtained for girders with planar webs, with or without stiffeners. Results are obtained using finite element analysis. Trapezoidal shape and girder geometry are taken from some of the elements used by Hassanein & Kharoob (2013a and 2013b) in their analysis of bridge girders with corrugated webs.

The comparative analysis presented in the paper is focused on the following points: local buckling of the web due to shear forces; ultimate strength of the girder under shear forces and bending moments; and global stiffness and ductility behavior. Results show that corrugated webs provides a significant increase in shear buckling resistance when compare with planar plates of the same thickness. However, corrugated webs are prone to fragile post buckling behavior. On the other hand, planar webs develop membrane stresses and provide a more ductile collapse. Moreover,

ultimate strength of stiffened enough planar web girders may be equivalent to that of corrugated webs.

In what follows, first we outline the problem statement. Then buckling results are presented, showing the number of stiffeners needed for a planar web in order to reach local buckling load equivalent to that of corrugated web. Next, ultimate strength analysis of girders with corrugated web are presented and compared with those obtained for planar web girders with 0, 1, 2 and 3 intermediate stiffeners.

2 PROBLEM STATEMENT

The paper has two main objectives. The first one is to determine elastic buckling load and ultimate strength of girders with trapezoidal corrugated web. The second is to obtain a clear picture of the corrugated web beneficial effect by comparing buckling load and ultimate strength results with those obtained for girders with planar webs, with or without stiffeners. All analysis are performed using finite element models with an I-section simple supported girder subjected to a load applied at the span center. The trapezoidal corrugated web is defined in Figure 1, where general geometric parameters are defined.

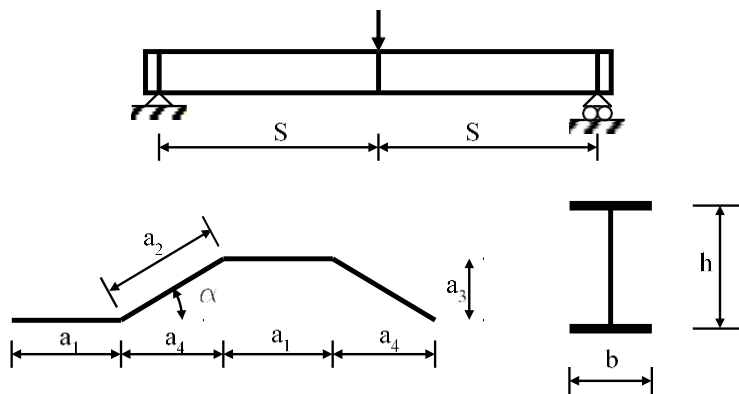


Figure 1. Geometric parameters.

2.1 Buckling analysis

In order to have a simple picture of the beneficial effect of using trapezoidal corrugated webs, our buckling analysis is centered on a simple question: how many stiffeners would be needed so that shear buckling load of a planar web would be equal to that of a corrugated web?.

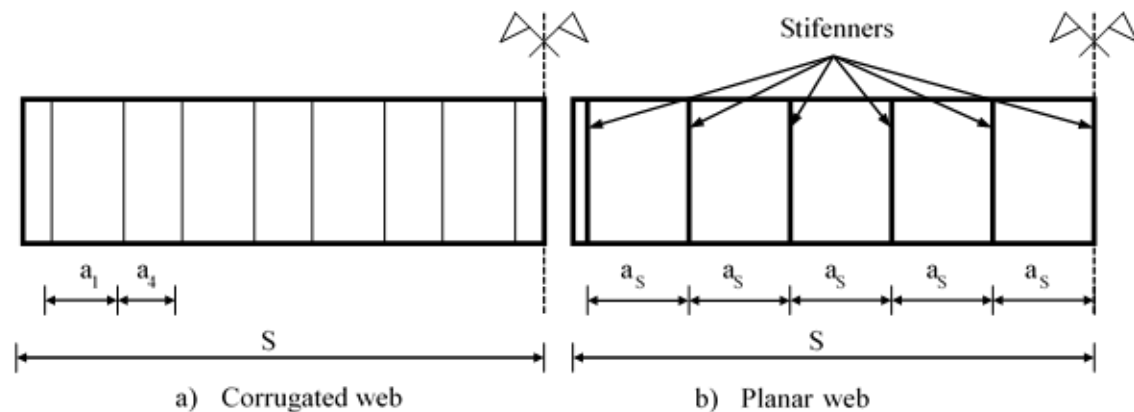


Figure 2. Corrugated web and stiffened planar web dimensions.

For this particular analysis we have worked with a trapezoidal wave with fixed $a_1=a_2=325$ mm and a corrugation angle α that varies from 25° to 45° . On the other hand, planar web is supposed to have equally separated stiffeners, being a_s the intermediate distance.

The elastic buckling analysis is performed for a web thickness, t_w , of 6, 8, 10, 12, 14, 16 and 18 mm, and a flange thickness $t_f=8t_w$, so that shear web buckling is present. I-section dimensions h and b are taken as 1000 and 400 mm respectively. The girder half span S is the distance corresponding to two trapezoidal waves, that is $S=4(a_1+a_4)$ with $a_4=a_2\cos\alpha$ (Figure 2).

For each web thickness and corrugation angle, buckling load is first determined for the corrugated web. Then, following an iterative process in which a_s is used as variable, the equivalent distance between stiffeners is determined so that corrugated web and stiffened planar web have the same buckling load.

2.2 Ultimate strength analysis

For the ultimate strength analysis a fixed trapezoidal wave geometry is used with the following dimensions: $a_1=a_2=325$ mm, $a_4=275$ and $a_3=175$ mm. Half span is taken as 4800 mm, which corresponds to 4 trapezoidal waves (Figure 3). Three values for web thickness t_w (6, 9 and 12 mm), and two for I-section high h (1600 and 2400 mm) are considered. Flange thickness t_f and wide b are taken as 50 and 500 mm respectively. Regarding planar web girders, four cases are considered, corresponding to the number of intermediate stiffeners: 0, 1, 2 and 3.

For all analysis, structural steel S355, with the properties defined by the Eurocode 3, is used. Following Driver et al. (2006) study, imperfections are taken for each girder using the first buckling mode scaled by a factor equal to the corresponding web thickness. The non-linear finite element analysis is performed using ANSYS Academic Mechanical and the force-displacement curve is followed until no further equilibrium point is achieved in the numerical integration.

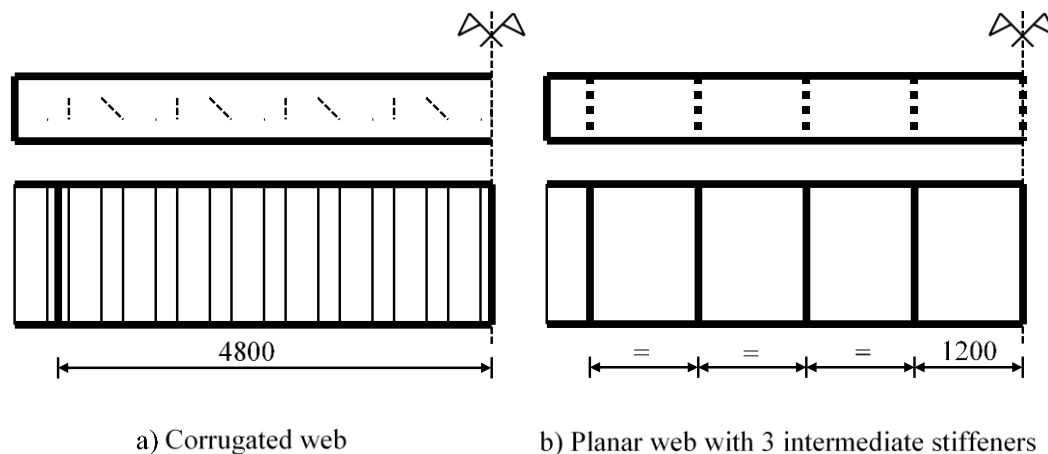


Figure 3. Corrugated web and stiffened planar web girders scheme.

3 BUCKLING RESULTS

Buckling analysis results are summarized in Figure 4. It can be seen that, in order to have similar buckling load, $t_w=6$ mm girders with planar web need to have intermediate stiffeners at distances a_s between $1,20a_1$ and $1,23a_1$ corresponding the smallest value of distance a_s to the higher corrugation angle. Distance a_s increases with web thickness, so that for t_w equal to 18 mm a_s varies from $1,40a_1$ to $1,73a_1$. Consequently, for a corrugation angle of 45° the stiffener intermediate distance is 390 mm for 6 mm web thickness and 455 mm for 18 mm.

These results show that folds on corrugated webs have the effect of non-rigid stiffeners. Buckling modes usually affect to more than one panel of the trapezoidal wave. On the other hand, since stiffeners used for planar webs have a thickness equal to $8t_w$, buckling modes for planar webs only affects one panel.

From the results it is clear that corrugation has a significant and positive effect on elastic shear buckling resistance.

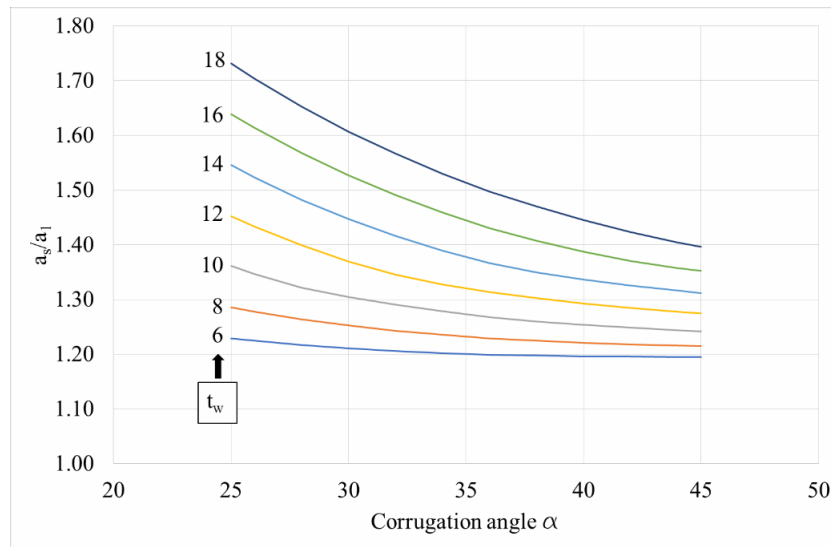


Figure 4. Stiffeners separation for equivalent buckling loads.

4 ULTIMATE STRENGTH RESULTS

Ultimate strength results are presented in a graphical way by the deformed shape at the point of maximum load and the force-displacement curve. All deformed shapes are shown multiplying the actual deformation by a factor of 5.

4.1 Girder with corrugated web

Ultimate strength of girders with trapezoidal corrugated web directly depends on web thickness and I-section high. Figure 5 shows that for shear web strength is the element that determines ultimate strength for girders with 6 and 9 mm web thickness. For 12 mm web thickness, failure is produced by bending moment affecting flanges at mid span.

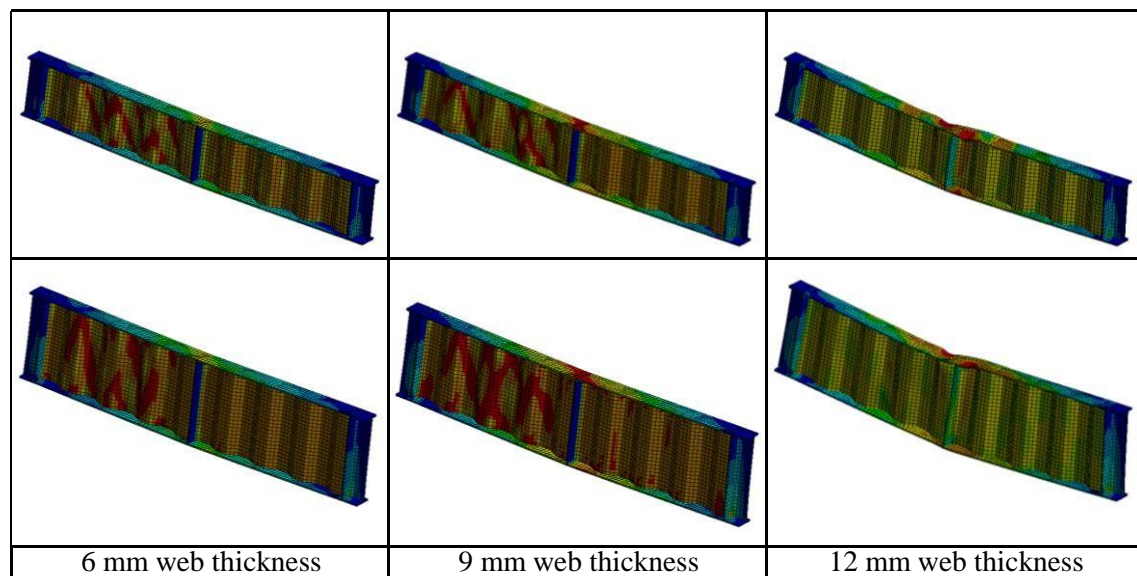


Figure 5. Deformed shapes for corrugated web girders.

Force-displacement curves are shown in Figure 6, where first number in captions refers to section high, the second to web thickness, and the letter C to corrugated web. It can be seen that shear failure of corrugated webs leads to linear and fragile behavior, in contrast with bending moment failure that takes places with a ductile process.

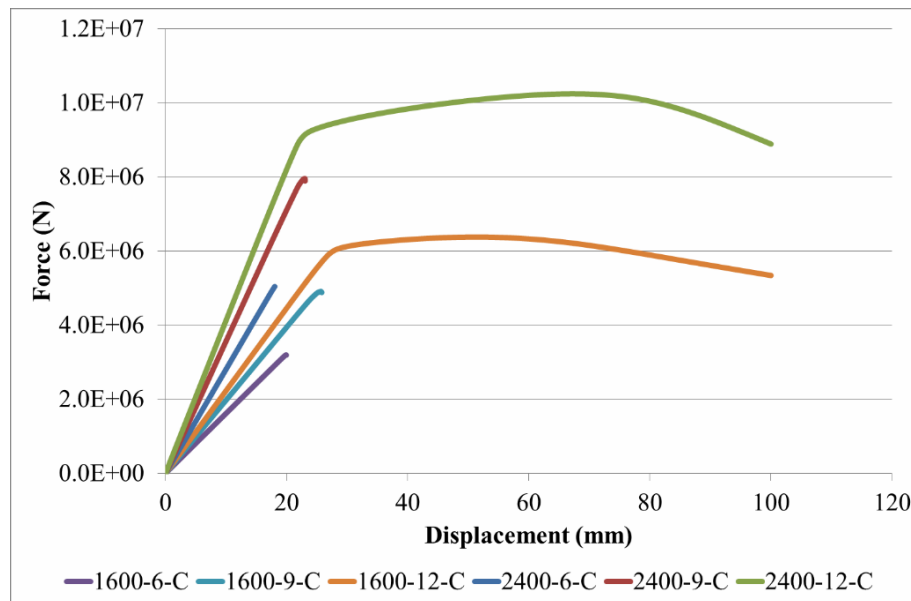


Figure 6. Force-Displacement curves for corrugated web girders.

4.2 Girder with planar web

As indicated above, four cases are considered for each planar web thickness. Figure 7 shows deformed shapes at maximum load, with a scale factor of 5, and force-displacement curves for 1600 mm high girders. The number of stiffeners is indicated by the number “n” in the caption “XXXX-X-PnS”. It can be seen that shear failure and ductile behavior are present for all web thicknesses. Similar results are obtained for 2400 mm high girders (Figure 8).

As expected, force-deformation curves indicate that initial girder stiffness (initial slope) does not depend on the number of stiffeners but on the web thickness. The number of stiffeners does influence girder ultimate strength for each t_w .

4.3 Comparison

FEM results show that the use of corrugated webs significantly increases ultimate strength when compared with unstiffened planar webs. This comparative benefit diminishes and may be canceled with the number of stiffeners. For the particular case of 1600 mm high section, planar web girders with three stiffeners have similar values of ultimate load and better initial rigidity than corrugated web girders. For 2400 mm high section, ultimate strength of corrugated web girders surmounts that of planar web girders with three stiffeners, but initial rigidity is lower. Figure 9 compares force-displacement curves of corrugated web girders and planar web girder with three stiffeners. Regarding failure mode, it is worth noting that corrugated web introduces flange failure possibility at lower loads, due to the increase of flange buckling length with web corrugation.

Another interesting result concerns to post-buckling resistance of girders with planar web. Results show that ultimate strength for planar web girders are usually higher than elastic buckling loads. This post-buckling resistance comes from the development of tension stresses as has been shown by Höglund (1997). Consequently, plane web girders have a ductile failure behavior while corrugated web girders have a fragile collapse. On the other hand, failure load for corrugated web girders are usually lower than corresponding elastic buckling load, and have a fragile mode.

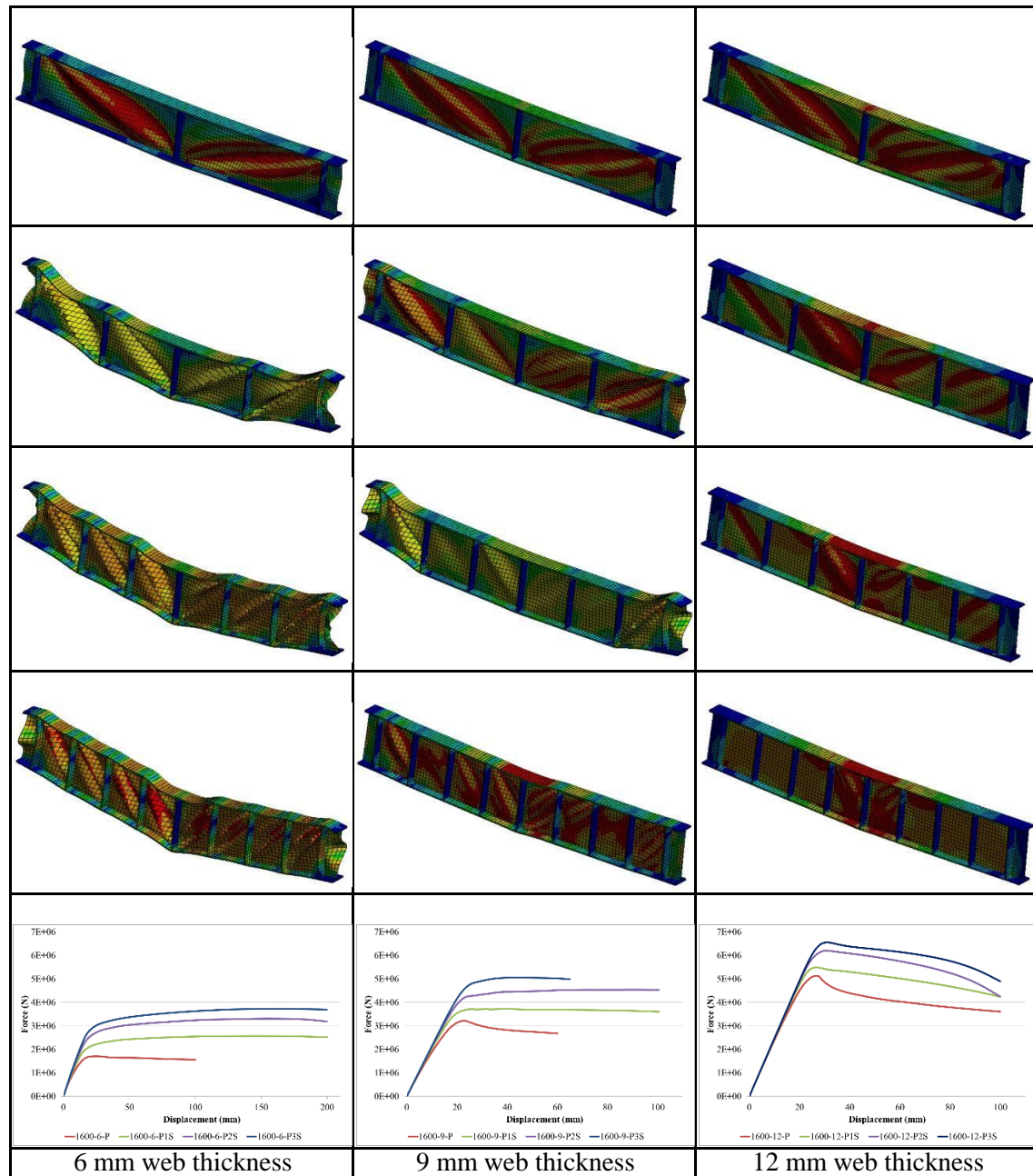


Figure 7. Deformed shapes and strength curves for planar web girders ($h = 1600$ mm).

5 CONCLUSIONS

A finite element study on buckling loads and ultimate strength of plated girders with trapezoidal corrugated webs have been presented. Additionally, results have been compared with those obtained for girders with both stiffened and un-stiffened planar webs.

Buckling analysis have shown that corrugation significantly increases buckling resistance. Moreover, trapezoidal wave with higher corrugation angle have higher buckling load. Results indicate that corrugation beneficial effect diminishes with plate thickness. The paper has also presented a study on the number of intermediate rigid stiffeners needed in planar webs in order to have the same buckling loads as the corrugated ones.

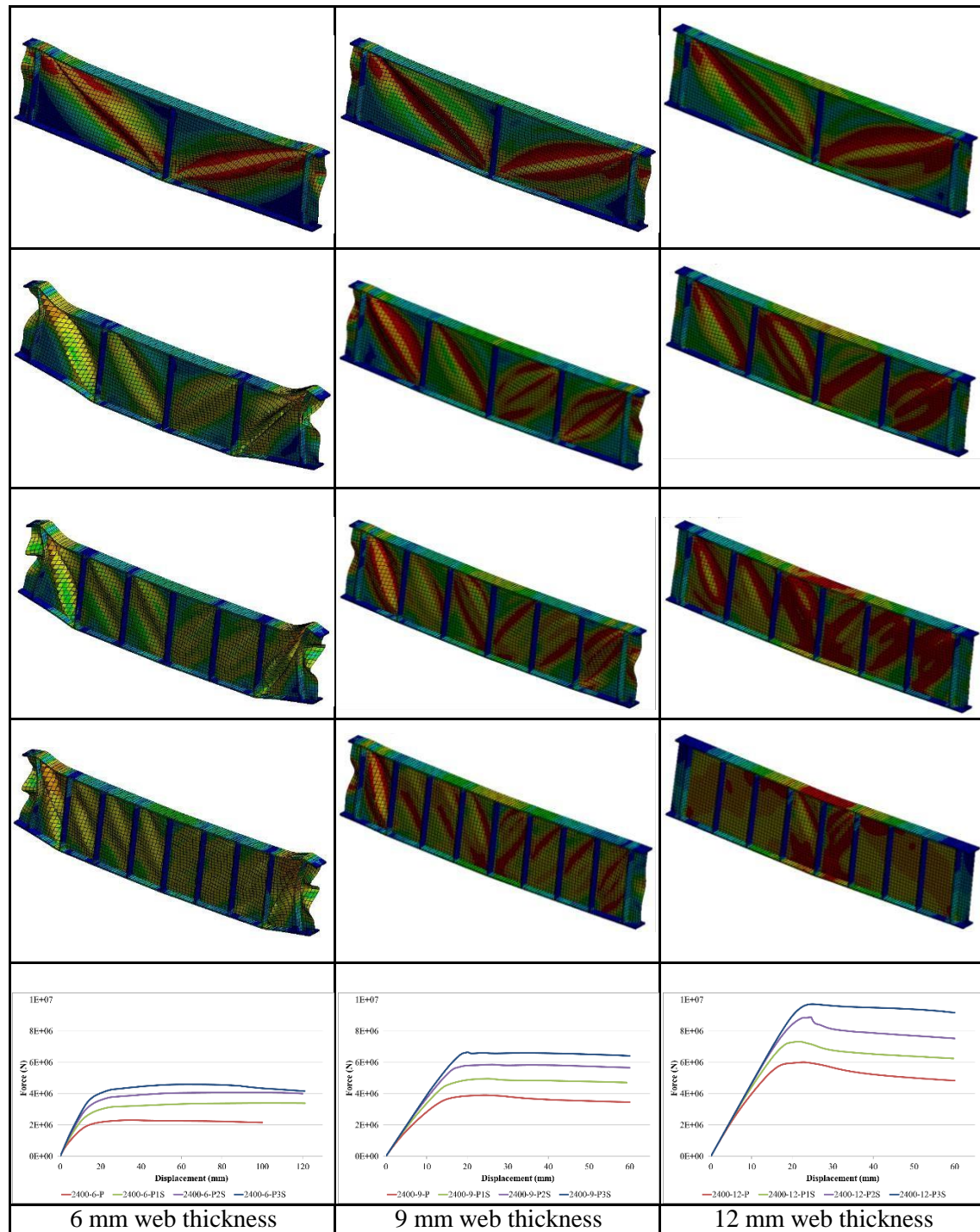


Figure 8. Deformed shapes and strength curves for planar web girders ($h = 2400$ mm).

Ultimate strength analysis have provided force-displacement curves for a set of corrugated web girders, varying I-section high and web thickness. These results have been compared with those corresponding to planar web girders with up to three intermediate rigid stiffeners. Corrugated web girders have higher ultimate strength than planar web girders. For a 2400 mm section high and 6 mm web thickness, corrugated web girder ultimate load doubles that of a planar web girder. Corrugated web failure has shown to be fragile, in contrast with planar web failure which is ductile.

Results have demonstrated that the use of intermediate stiffeners significantly improves ultimate strength of planar web girders. In fact, it has been shown that for 1600 mm section high, planar web girders with three stiffeners have similar resistance than corrugated web girders. For the 2400 mm section high cases, three stiffeners are not enough to reach equivalent results, par-

ticularly for 6 and 9 mm web plate thicknesses.

Finally, results for corrugated web girders with 12 mm web plate thickness have shown that corrugation diminishes girder resistance to flange buckling, something related to the increase of flange buckling length with corrugation.

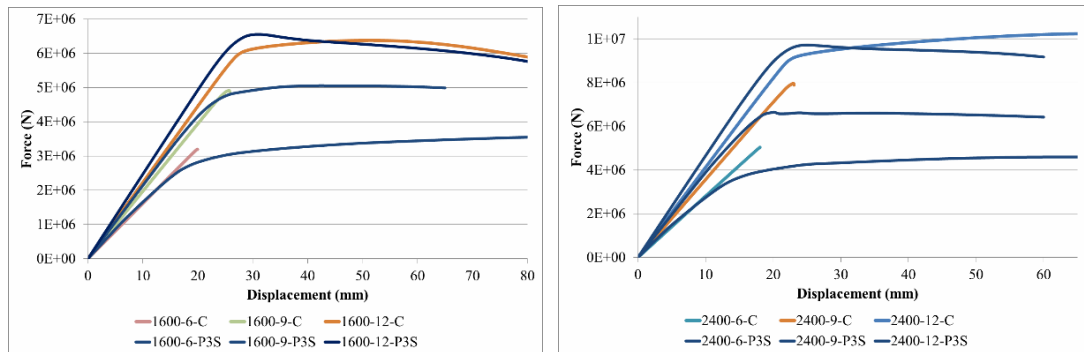


Figure 9. Comparison of force-displacement curves.

REFERENCES

- Abbas, H.H., Sause, R. & Driver, R.G. 2006. Behavior of corrugated web I-girders under in-plane loads. *Journal of Engineering Mechanics* 132 (8): 806-814.
- Abbas, H.H., Sause, R. & Driver, R.G. 2007a. Analysis of flange transverse bending of corrugated Web I-girders under in-plane loads. *Journal of Structural Engineering* 133 (3): 347-355.
- Abbas, H.H., Sause, R. & Driver, R.G. 2007b. Simplified analysis of flange transverse bending of corrugated web I-girders under in-plane moment and shear. *Engineering Structures* 29 (11): 2816-2824.
- Driver, R.G., Abbas, H.H. & Sause, R. 2006. Shear behavior of corrugated web bridge girder. *Journal of Structural Engineering* 132 (2): 195-203.
- Elgaaly, M., Seshadri, A. & Hamilton, R.W. 1997. Bending strength of steel beams with corrugated webs. *Journal of Structural Engineering* 123 (6): 772-782.
- Elgaaly, M. & Seshadri, A. 1998. Steel built-up girders with trapezoidally corrugated webs. *Engineering Journal* 35 (1): 1-10.
- Hasan, Q.A., Wan Badaruzzaman, W.H., Al-Zand, A.W. & Mutalib, A.A. 2017. The state of the art of steel and steel concrete composite straight plate girder bridges. *Thin-Walled Structures* 119: 988-1020.
- Hassanein, M.F. & Kharoob, O.F. 2013a. Behavior of bridge girders with corrugated webs: (I) real boundary conditions at the juncture of the web and flanges. *Engineering Structures* 57: 554-564.
- Hassanein, M.F. & Kharoob, O.F. 2013b. Behavior of bridge girders with corrugated webs: (II) shear strength and design. *Engineering Structures* 57: 544-553.
- Hoglund, T. 1997. Shear buckling resistance of steel and aluminium plate girders. *Thin-Walled Structures* 29 (1-4): 13-30.
- Jáger, B., Dunai, L. & Kövesdi, B. 2015. Girders with trapezoidally corrugated webs subjected by combination of bending, shear and path loading. *Thin-Walled Structures* 96 (art. no. 4603): 227-239.
- Jáger, B., Dunai, L. & Kövesdi, B. 2017a. Flange buckling behavior of girders with corrugated web Part I: Experimental study. *Thin-Walled Structures* 118: 181-195.
- Jáger, B., Dunai, L. & Kövesdi, B. 2017b. Flange buckling behavior of girders with corrugated web Part II: Numerical study and design method development. *Thin-Walled Structures* 118: 238-252.
- Jáger, B., Dunai, L. & Kövesdi, B. 2017c. Experimental investigation of the M-V-F interaction behavior of girders with trapezoidally corrugated web. *Engineering Structures* 133: 49-58.
- Leblouba, M., Barakat, S., Altoubat, S., Junaid, T.M. & Maalej, M. 2017a. Normalized shear strength of trapezoidal corrugated steel webs. *Journal of Constructional Steel Research* 136: 75-90.
- Leblouba, M., Junaid, M.T., Barakat, S., Altoubat, S. & Maalej, M. 2017b. Shear buckling and stress distribution in trapezoidal web corrugated steel beams. *Thin-Walled Structures* 113: 13-26.
- Luo, R. & Edlund, B. 1996. Shear capacity of plate girders with trapezoidally corrugated webs. *Thin-Walled Structures* 26: 19-44.
- Pasternak, H. & Kubieniec, G. 2010. Plate girders with corrugated webs. *Journal of Civil Engineering and Management* 16 (2): 166-171.

Bibliografía

- [1] L.L. Valledado Cordobés. Web buckling loads of plate girders: Definition of a parameter that relates standard and corrugated webs, June 2018.
- [2] Q.A. Hasan, W.H. Wan Badaruzzaman, Ahmed W. Al-Zand, Azrul A. Mutalib. The state of the art of steel and steel concrete composite straight plate girder bridges. *Thin-Walled Structures*, 119: 988-1020, 2017.
- [3] R. Luo and B. Edlund. Shear capacity of plate girders with trapezoidally corrugated webs. *Thin-Walled Structures*, 26(1):19–44, January 1996.
- [4] M. Elgaaly, A. Seshadri and R.W. Hamilton. Bending strength of steel beams with corrugated webs, *Journal of Structural Engineering* 123 (6): 772-782, 1997.
- [5] M. Elgaaly and A. Seshadri. Steel built-up girders with trapezoidally corrugated webs, *Engineering Journal* 35 (1): 1-10, 1998.
- [6] M. Leblouba , S. Barakat, S. Altoubat, T.M. Junaid and M. Maalej. Normalized shear strength of trapezoidal corrugated steel webs, *Journal of Constructional Steel Research* 136: 75-90, 2017.
- [7] J. Moon, J. Yi, B. H. Choi, and H. E. Lee. Shear strength and design of trapezoidally corrugated steel webs. *Journal of Constructional Steel Research*, (65):1198–1205, July 2017.
- [8] M.F. Hassanein and O.F. Kharoob. Behavior of bridge girders with corrugated webs: Real boundary condition at the juncture of the web and flanges. *Engineering Structures*, 57:554–567, April 2013.
- [9] M.F. Hassanein and O.F. Kharoob. Behavior of bridge girders with corrugated webs: (II) Shear strength and design. *Engineering Structures*, 57: 544-553, June 2013.
- [10] B. Kövesdi, B. Jäger, L.Dunai. Bending and shear interaction behavior of girders with trapezoidally corrugated webs. *Journal of Constructional Steel Research* 121(2016) 383-397.
- [11] B. Kövesdi, B. Jäger, L.Dunai. Stress distribution in the flanges of girders with corrugated webs. *Journal of Constructional Steel Research* 79 (2012) 204-215.
- [12] H. Pasternak, G. Kubieniec. Plate girders with corrugated webs, *Journal of civil engineering and management*, 16(2): 166-171, 2010.
- [13] H.H. Abbas, R. Sause, R.G. Driver. Analysis of flange transverse bending of corrugated Web I-girders under in-plane loads, *Journal of Structural Engineering*, 133(3), pp.347-355, 2007.

- [14] H.H. Abbas, R. Sause, R.G. Driver. Simplified analysis of flange transverse bending of corrugated Web I-girders under in plane moment and shear, *Engineering Structures*, 29(11), pp.2816-2824, 2007.
- [15] H.H. Abbas, R. Sause, R.G. Driver. Behavior of corrugated Web I-girders under in plane loads, *Journal of Engineering Mechanics*, 132(8), pp.806-814, 2006.
- [16] D. Dubina, V. Ungureanu, L. Gîlia. Experimental investigations of cold-formed steel beams of corrugated web and built-up section for flanges, *Thin-Walled Structures*, 90, pp.159-170, 2015.
- [17] E. Zeballos, M.F. Hassanein, E. Real, E. Mirambell. Shear evaluation of tapered bridge girder panels with steel corrugated webs near the supports of continuous bridges, *Engineering Structures*, 113, pp. 149-159, 2016.
- [18] F. Sinur, D. Beg. Moment-shear interaction of stiffened plate girders-test and numerical model verification, *Journal of Constructional Steel Research* 85 (2013) 116-129.
- [19] F. Sinur, D. Beg. Moment-shear interaction of stiffened plate girders-numerical study and reliability analysis, *Journal of Constructional Steel Research* 88 (2013) 231-243.
- [20] F. Shahabian Moghadam. Behavior of plate girders subjected to combined bending and shear loading, *Sci Iran* 15 (2008).
- [21] E. Zeballos, M. F. Hassanein, E. Real, and E. Mirambell. Shear evaluation of tapered bridge girder panels with steel corrugated webs near the supports of continuous bridges. *Engineering Structures*, 113:149–159, January 2016.
- [22] E. J. Zeballos Barrios. Shear resistance of different web panels of linearly tapered bridge girders with steel corrugated webs, 2015.
- [23] B. Johansson, R. Maquoi, G. Sedlacek, C. Müller, and D. Beg. Commentary and worked examples to EN1993-1-5 "Plated structural members". JRC - European Commission, Italy, 1st ed edition, 2007.
- [24] A. González, L. Valledado and M.A. Serna. A comparative analysis on the stability and ultimate strength of steel plated girders with planar and corrugated webs, Department of Structural and Mechanical Engineering, University of Cantabria, Spain, 2019.
- [25] European Committee for Standardization, Rue de Stassart, 36 B-1050 Brussels. *Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements (EN1993-1-5)*, 2006.